



**MARIANA MARGARIDA MATEUS PINTO**

Licenciada em Engenharia Geológica

**Evolução espaço-temporal das alterações hidrodinâmicas e hidroquímicas numa antiga barragem de rejeitados mineiros em resultado de obras de recuperação ambiental**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Geológica  
(Georrecursos)

Orientador: Doutora Sofia Verónica Trindade Barbosa,  
Professora Auxiliar – FCT/UNL

Co-Orientador: Engenheiro Edgar Filipe Domingues de  
Carvalho

Júri:

Presidente: Judite Isabel Cândido Fernandes

Arguente: Prof. Doutora Maria da Graça Azevedo Brito

Vogal: Prof. Doutora Sofia Verónica Trindade Barbosa



FACULDADE DE  
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

**Março 2016**



## **Evolução espaço-temporal das alterações hidrodinâmicas e hidroquímicas numa antiga barragem de rejeitados mineiros em resultado de obras de recuperação ambiental**

“© Copyright” Mariana Margarida Mateus Pinto, da FTC/UNL e da UNL.

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.



## **AGRADECIMENTOS**

O desenvolvimento desta dissertação contou com importantes apoios e incentivos que contribuíram para que esta etapa fosse cumprida e aos quais agradeço profundamente.

À Professora Doutora Sofia Barbosa, a quem devo um forte agradecimento pela sua orientação e dedicação ao longo de todas as fases de trabalho, das quais dependeu a concretização desta dissertação. Pela sua colaboração, pelo seu incentivo e motivação em momentos de dúvida, pelo seu rigor e pelos seus conselhos que, desde o primeiro momento, procurou transmitir.

À Empresa de Desenvolvimento Mineiro – EDM e em particular ao Engenheiro Edgar Carvalho e à Doutora Catarina Diamantino por toda a ajuda e disponibilidade prestada.

Aos docentes do Departamento de Ciências da Terra da FCT, pela partilha de conhecimentos durante o meu percurso académico e que tanto contribuíram na minha formação e crescimento.

Aos meus amigos mais próximos, que acompanharam todo o meu percurso, mostrando uma perpétua preocupação e compreensão, incentivando-me sempre e entendendo as sucessivas ausências. Aos colegas de faculdade, indispensáveis no meu crescimento, demonstrando sempre um grande espírito de entajuda ao longo de todos estes anos, deixo um agradecimento muito sincero a todos eles e em especial à Soraia Botelho, Catarina Fernandes, Ana Rita Ferreira, Yucânia da Cruz, Ana Luísa Ramada, David Silva, João Ferreira, Raúl Conceição e João Miranda.

Ao Tiago, por estar presente em mais uma etapa da minha vida. Pelo seu excecional apoio, companheirismo, cumplicidade e carinho ao longo deste período.

À minha irmã Joana e ao meu cunhado João, pelo apoio incondicional e pelas palavras e conselhos de motivação sempre presentes, incentivando-me continuamente.

Aos meus pais, um profundo agradecimento por tudo o que contribuíram ao longo desta caminhada. Tudo o que alcancei, devo-o a vós. Pelo apoio incondicional e por todo o esforço e sacrifício prestado para concluir mais uma etapa.



## RESUMO

A investigação desenvolvida teve por objetivo principal verificar as evoluções hidrodinâmicas e hidroquímicas ocorridas numa antiga barragem de rejeitados mineiros em resultado das obras de recuperação ambiental desenvolvidas, mediante a adoção de metodologias específicas de tratamento e análise geomatemática de dados e de modelação numérica de escoamentos.

Como caso de estudo considerou-se a situação hipotética de uma barragem de rejeitados mineiros resultantes de uma exploração de minérios de rádio e de urânio, sujeita a obras de recuperação ambiental. Estas obras implicaram a aplicação de um sistema de cobertura multicamada tendo sido desenvolvidas demais ações que, no todo, resultam na mitigação dos impactes radiológicos, no controlo e redução das quantidades de lixiviados geradas e dos efeitos de dispersão da contaminação química. Considerou-se, igualmente, a existência de trabalhos de modelação necessários para a melhoria das condições de segurança relacionadas com a estabilidade geomecânica de taludes e dos revestimentos entretanto aplicados.

Foram gerados modelos hidrodinâmicos da área da barragem para duas condições distintas: uma, respeitante a uma condição de partida, representada por um modelo homogéneo e uma outra, desenvolvida na sua sequência e que, expressando a heterogeneidade característica do meio em análise, permitisse estabelecer uma situação de comparação entre os cenários ante e pós-obra.

Subsequentemente efetuou-se uma análise detalhada das possíveis evoluções dos fenómenos hidroquímicos mais relevantes, comparando-se períodos ante-obra e pós-obra, através de uma análise exploratória das séries de dados onde se avaliou, temporal e espacialmente, a evolução de parâmetros indicadores relacionados com os fenómenos de contaminação em causa, neste caso, concreto, os que são devidos à exploração de minérios de urânio e rádio.

A análise de tendências e modificações hidroquímicas foram conseguidas através de uma análise univariada espaço-temporal dos indicadores através de estatísticos básicos (gráficos de dispersão, histogramas de frequência e *box-plots*). A análise espacial foi feita a partir da execução de mapas hidroquímicos morfológicos das concentrações dos elementos em estudo, efetuados com base nos métodos geoestatísticos da krigagem ordinária da indicatriz e morfologia.

As alterações hidroquímicas verificadas foram associadas aos modelos hidrodinâmicos de escoamento na barragem de forma a compreender a influência dos fluxos nos fenómenos evolutivos em termos de dispersão e de mitigação da carga poluente.

**Palavras-chave:** barragem de rejeitados mineiros; modelação e evolução hidrodinâmica; análise espaço-temporal de tendências





## ABSTRACT

The main objective of this research was to verify the hydrodynamic and hydrochemical changes occurred in an old tailings dam as a result of the works of environmental recovery developed by the adoption of specific treatment methodologies, geomathematics data analysis and hydrodynamic numerical modelling.

The case study is an hypothetical old tailings dam associated with the operation of radium and uranium ore.

It was considered that the site in question was subject to a relevant environmental rehabilitation project in order to mitigate the radiological impacts, control leachate generation and chemical contamination dispersion, as well as to create the necessary security conditions for the geomechanical stability of slopes and its possible added coatings.

The work developed allowed us to assess the progresses of the water through the sub-surface and the underground in and around the immediate surroundings of the tailings dam as a result of the environmental recovery works in this area.

Initially, an aggregation of information and general records was performed on the site, then groundwater models of the old dam were generated for two different conditions: one, considering a starting condition, represented by a homogeneous model, as well as another developed in its sequence and expressing the characteristic heterogeneity of the environment in question, allowing to establish a comparison between the before and after situations.

Subsequently it analysed in detail the most important hydrochemistry phenomena that took place at the dam. The variations of the indicator parameters related to the contamination phenomena in question were considered, comparing the periods before and after the performed work, and utilising an exploratory analysis of the series data for a more concrete assessment, both temporally and spatially.

Detecting and estimating trends of water quality parameters have been achieved through a spatiotemporal univariate analysis of indicators through basic statistics (scatter plots, frequency histograms and box-plots). The spatial analysis was made from the implementation of morphological hydrochemical maps of the concentrations of the elements under study, carried out based on geostatistical methods of Indicator Ordinary Kriging and Morphology.

The verified hydrochemical changes were associated with the hydrodynamic models of the flow in the dam in order to understand the influence of flows in the evolutionary phenomena regarding the dispersion and mitigation of pollution load.

**Keywords:** tailings dam; modelling and hydrodynamic evolution; spatiotemporal analysis of trends



## ÍNDICE DE MATÉRIAS

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
1.1	Enquadramento e Relevância do tema .....	1
1.2	Estado da arte .....	2
1.3	Metodologia .....	5
<b>2</b>	<b>PRESSUPOSTOS DO CASO DE ESTUDO: ANTIGA BARRAGEM DE REJEITADOS MINEIROS.....</b>	<b>7</b>
<b>3</b>	<b>FUNDAMENTOS TEÓRICOS .....</b>	<b>9</b>
3.1	Modelação Hidrogeológica .....	9
3.1.1	Princípios fundamentais do escoamento da água subterrânea .....	15
3.2	Análise Geoestatística.....	16
3.2.1	Estimador linear geoestatístico: Krigagem.....	16
3.2.2	Formalismo da indicatriz.....	17
3.2.3	Morfologia geoestatística .....	17
3.2.4	Zonas de incerteza morfológica.....	17
<b>4</b>	<b>CASO DE ESTUDO.....</b>	<b>19</b>
4.1	Introdução .....	19
4.2	Climatologia e Cálculo do Balanço Hídrico.....	19
4.3	Análise sintética de séries temporais de dados piezométricos .....	22
4.4	Modelação hidrodinâmica dos escoamentos na área da barragem .....	22
4.4.1	Princípios e Pressupostos dos modelos numéricos desenvolvidos .....	22
4.4.2	Construção do modelo numérico interpretativo de referência .....	26
4.4.2.1	Resultados do modelo numérico de base.....	36
4.4.3	Modelo numérico interpretativo considerando efeitos de heterogeneidade .....	40
4.4.4	Conclusões Hidrodinâmica .....	47
4.5	Análise univariada espaço-temporal das tendências de evolução hidroquímica na barragem .....	49
<b>5</b>	<b>ANÁLISE CONJUNTA DAS EVOLUÇÕES E TENDÊNCIAS ESPACIO-TEMPORAIS HIDRODINÂMICAS E HIDROQUÍMICAS .....</b>	<b>50</b>
<b>6</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>51</b>
<b>7</b>	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>53</b>



## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Principais etapas da metodologia aplicada .....	6
Figura 3.1. Etapas na modelação .....	10
Figura 4.1. Modelo esquemático bidimensional no plano XY das entradas e saídas de água no sistema.....	25
Figura 4.2. Esquematização do modelo conceptual quase-tridimensional situação Ante-Obra ..	25
Figura 4.3. Esquematização do modelo conceptual quase-tridimensional situação Pós-Obra ....	26
Figura 4.4. Etapas da modelação na área de estudo .....	27
Figura 4.5. Dimensão da malha do modelo com MDT da situação ante-obra.....	28
Figura 4.6. Morfologia da barragem na situação Ante-Obra.....	29
Figura 4.7. Morfologia da barragem na situação Pós-Obra.....	30
Figura 4.8. Esq.: Topografia Ante-Exploração 1942. Dir.: Topografia topo L2 ( <i>PMWIN</i> ) .....	30
Figura 4.9. Condições fronteira. ....	32
Figura 4.10. a) Método de procura quadrangular b) Método de procura Octante.....	33
Figura 4.11. Carga hidráulica - situação ante-obra (L2) .....	34
Figura 4.12. Resultados do modelo fluxo de referência no período I - Ante Obra .....	36
Figura 4.13. Perfil na direção S-N do modelo fluxo de referência no período I – Ante Obra.....	36
Figura 4.14. Perfil na direção W-E do modelo fluxo de referência no período I – Ante Obra.....	36
Figura 4.15. Nível de Rebaixamento no período I - Ante Obra.....	37
Figura 4.16. Resultados do modelo fluxo de referência no período II - Pós Obra.....	38
Figura 4.17. Perfil na direção S-N do modelo fluxo de referência no período II – Pós Obra .....	38
Figura 4.18. Perfil na direção W-E do modelo fluxo de referência no período II – Pós Obra .....	38
Figura 4.19. Nível de Rebaixamento no período II - Pós Obra .....	39
Figura 4.20. Localização dos perfis realizados na barragem.....	40
Figura 4.21. Perfil (PRE-1) de resistividade elétrica limite E barragem.....	40
Figura 4.22. Perfil (PRE-4) de resistividade elétrica limite SW barragem .....	40
Figura 4.23. Perfil (PRE-5) de resistividade elétrica limite NW barragem.....	40
Figura 4.24. Resultados do modelo de fluxo com características heterogêneas no período I – Ante-Obra.....	41
Figura 4.25. Perfil na direção S-N do modelo fluxo heterogéneo no período I – Ante-Obra.....	41
Figura 4.26. Perfil na direção W-E do modelo fluxo heterogéneo no período I – Ante-Obra.....	42
Figura 4.27. Nível de Rebaixamento no período I - Ante Obra.....	42
Figura 4.28. Resultados do modelo de fluxo com características heterogêneas no período II – Pós-Obra.....	43
Figura 4.29. Perfil na direção S-N do modelo fluxo heterogéneo no período II – Pós-Obra .....	43
Figura 4.30. Perfil na direção W-E do modelo fluxo heterogéneo no período II – Pós-Obra .....	43
Figura 4.31. Nível de Rebaixamento no período II - Pós Obra .....	44
Figura 4.32. Resultados do modelo de fluxo com características heterogêneas no período I – Ante-Obra.....	45
Figura 4.33. Perfil na direção S-N do modelo fluxo heterogéneo no período I – Ante-Obra.....	45
Figura 4.34. Perfil na direção W-E do modelo fluxo heterogéneo no período I – Ante-Obra.....	45
Figura 4.35. Nível de Rebaixamento no período I – Ante-Obra na camada 1, 2 e 3 .....	45
Figura 4.36. Resultados do modelo de fluxo com características heterogêneas no período II – Pós-Obra.....	46
Figura 4.37. Perfil na direção S-N do modelo fluxo heterogéneo no período II – Pós-Obra .....	46
Figura 4.38. Perfil na direção W-E do modelo fluxo heterogéneo no período II – Pós-Obra .....	46
Figura 4.39. Nível de Rebaixamento no período II – Pós-Obra na camada 1, 2 e 3 .....	47

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 4.40. Locais de exurgências geradas a partir da barragem - situação ante-obra.....	49
Figura 4.41. Escoamentos na área da Barragem e sua envolvente - situação ante-obra.....	49
Figura 4.42. Escoamentos preferenciais e locais de exurgências .....	49

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 3.1. Tipos de fronteiras dos modelos .....	14
Tabela 4.1. Cálculo da Evapotranspiração Potencial .....	20
Tabela 4.2. Cálculo do Balanço Hídrico mensal em mm .....	21
Tabela 4.3. Síntese de recolha de informação para a construção do modelo.....	23
Tabela 4.4. Síntese da Geometria do Modelo.....	31
Tabela 4.5. Síntese das Condições Fronteira definidas no Modelo .....	32
Tabela 4.6. Síntese da definição da Carga Hidráulica no Modelo .....	34
Tabela 4.7. Síntese Parâmetros Introduzidos no Modelo .....	35





# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Enquadramento e Relevância do tema

Os principais objetivos desta investigação focaram-se na avaliação da evolução espaço-temporal das alterações hidrodinâmicas e hidroquímicas, numa antiga barragem de rejeitados mineiros. A avaliação foi feita sob o objetivo primordial de se averiguar os efeitos de minimização e mitigação decorrente das obras de recuperação ambiental desenvolvidas nesta área, de forma a se depreender quais as modificações sofridas e por via da realização de comparações de acordo com os cenários evidenciados entre a situação ante e pós-obra.

A análise efetuada foi desenvolvida a partir de uma série de dados, de furos e piezómetros de monitorização, instalados na barragem e na sua envolvente imediata, e de registos de parâmetros qualitativos e quantitativos de águas sub-superficiais e subterrâneas.

O estudo desenvolvido permitiu compreender a evolução das diferenças entre tipos distintos de hidrofáceis em termos hidroquímicos que refletem condições distintas do meio em termos dos efeitos de oxidação-redução. Este ponto é um aspeto fulcral para a total compreensão da efetividade dos processos de recuperação ambiental em meios como o deste caso de estudo, e na análise subsequente de possíveis evoluções futuras.

A análise mineralógica e geoquímica das fases primárias e igualmente dos efeitos secundários, de alteração supergénica, que poderão ocorrer nos minerais primários contidos na matriz dos materiais depositados em escomboreiras desde há várias décadas constituem, um aspeto fulcral, pelas suas fortes implicações a jusante.

A existência de distintas composições no corpo destas barragens em resultado da variação temporal da matriz lítica depositada (dos “*tailings*”) e de processos hidrogeoquímicos que podem ocorrer entre as águas de circulação e os resíduos depositados são encontradas na literatura, sob indicação de distintos autores.

As condições de evolução geoquímica devidas a alteração mineralógica secundária dos resíduos que são acumulados em barragens rejeitados e instalados em depósitos essencialmente de natureza granítica de tipo filoniano é um aspeto relevante na análise da evolução de fácies hidrogeoquímicas.

Considerando a existência deste tipo de fenómenos, o caso de estudo considerado na presente dissertação concentrou-se no desenvolvimento de uma modelação hidrodinâmica e hidroquímica do meio hídrico. Para efeitos de modelação e em termos comparativos, não só foi considerado o corpo da própria barragem, como o meio hídrico subterrâneo a esta subjacente tentando-se, na medida do possível, verificar as alterações físicas e químicas resultantes das obras de recuperação ambiental.

Compreender a relação entre as condições de escoamento e a evolução espaço-temporal hidroquímica é fundamental. As modificações temporais de espécies químicas ocorridas estão altamente relacionadas pelas condições físico-químicas do meio hídrico. É importante a determinação de fluxos de escoamento e o conhecimento das condições hídricas à superfície e em profundidade devido à capacidade de mobilidade e solubilidade de elementos presentes em locais contaminados.

A geoquímica e geologia local é responsável pela distribuição e ocorrência dos radionuclídeos nas águas subterrâneas (Carvalho, 2010).

### 1.2 Estado da arte

Como resultado da necessária exploração mineira que se regista em termos globais, desde há centenas de anos, verifica-se a geração de grandes quantidades de resíduos, existindo, por isso, um grande número de depósitos de rejeitados de grande expressão em termos regionais em todo o mundo. Nestes depósitos são indubitavelmente gerados lixiviados dotados de uma elevada carga poluente que, de forma ativa, podem prejudicar o meio envolvente ao longo de extensos períodos de tempo.

Por razões de natureza ambiental e inclusivamente devidas ao potencial de exploração de CRM (“Critical Raw Materials”) a partir fontes secundárias como resíduos mineiros, o conhecimento e investigação da composição mineralógica e geoquímica dos materiais rejeitados depositados, bem como da qualidade dos lixiviados, tornou-se numa questão de elevada relevância económico-ambiental.

Vários estudos têm sido desenvolvidos em torno de locais com presença de *tailings* mineiros em recuperação: casos como os de Mount Pleasant, nos EUA; Kristineberg e Stekenjokk, no norte da Suécia; Taxco e Guerrero, no sul do México; Minas de Copperbelt, na Zâmbia; Joutel, no Canadá; entre outros. Estes tiveram como principal objetivo a avaliação de métodos de remediação existentes, sob a premissa de os potenciar, de um ponto de vista de eficiência e de custo-benefício, de maneira a resolver de forma mais célere e eficaz os problemas ambientais relacionados com as áreas mineiras em questão e, se possível, minimizar os resíduos contaminados (Holmström, 2001).

As drenagens ácidas de mina (DAM) ou *Acid Mine Drainage* (AMD) têm-se constituído, tal como os *tailings* mineiros, como um sério risco ambiental, pela potencialidade do seu impacte ambiental, visto que esta drenagem possui, tipicamente, um pH baixo e altas concentrações de sulfatos, ferro e outros metais (Blowes *et al.*, 2003). Este processo (DAM) origina-se a partir de materiais compostos por sulfuretos que quando são expostos pelas atividades mineiras, oxidam em reação com a água e o oxigénio e, igualmente, na presença de bactérias. A presença do sulfureto pirite é crucial para o desencadeamento deste processo.

Estudos decorridos em países de todo o mundo, como o Canadá (McGregor *et al.*, 1998; Johnson *et al.*, 2000; Lefebvre *et al.*, 2001; Sracek *et al.*, 2004; Salzsauer *et al.*, 2005), a Suécia (Strömberg & Banwart, 1999; Salmon & Malmström, 2004), o Peru (Smuda *et al.*, 2007), a Rússia (Giere *et al.*, 2003), e a Austrália (Ritchie, 1994), demonstram a sensibilidade que a comunidade científica tem vindo a depositar neste assunto. Através de investigações desta índole, ao longo dos tempos, compreendeu-se que o potencial para geração e duração de drenagens ácidas de minas num determinado local depende de complexos processos biológicos, geoquímicos e físicos. Estes componentes são determinantes na mobilização e dispersão de contaminantes de áreas mineiras contaminadas, bem como de depósitos de resíduos remediados.

A avaliação do impacte ambiental de depósitos de rejeitados mineiros passa pela capacidade de compreender e prever a evolução da qualidade das drenagens que podem ser geradas ao longo do tempo. A escolha de um leque de opções de remediação requer a quantificação de um determinado número de processos (bio)geoquímicos e físicos que ocorrem no depósito e a compreensão dos seus complexos mecanismos de resposta (Salmon & Malmström, 2003).

É, neste contexto, importante proceder a uma completa caracterização dos resíduos minérios, no que diz respeito à mineralogia, composição química e água intersticial, de forma a tentar identificar reações significativas que possam ter ocorrido antes e depois da remediação. Esta é necessária para compreender o problema das drenagens ácidas de minas, de forma a prever futuros problemas e encontrar métodos de remediação eficientes (Holmström, 2001).

Segundo alguns estudos anteriores, relativos à modelação de drenagem de águas ácidas em depósitos de *tailings*, concentraram-se, essencialmente, no fornecimento oxidante feito através da difusão de  $O_2$  em combinação com uma representação simplificada da geoquímica (casos como: Jaynes *et al.*, 1984; Elberling *et al.*, 1994; Wunderly *et al.*, 1996; Werner & Berglund, 1999; Bain *et al.*, 2000).

Um método para impedir a formação de drenagens ácidas de resíduos mineiros consiste em limitar o fornecimento de  $O_2$ , cobrindo os resíduos com água para que inibam fortemente a taxa de oxidação funcionando como uma barreira ao  $O_2$ .

Os lixiviados ácidos podem ser gerados pela interação da água meteórica com o material rejeitado durante eventos de precipitação, podendo gerar lixiviados com pH entre 2,4-2,5 e níveis variáveis de Sulfatos, e de elementos como o As, Fe, Mn, Zn e Pb. A maioria das amostras demonstram um enriquecimento de metal durante as estações secas (Mendonza *et al.*, 2005).

A oxidação de minerais de sulfuretos em pilhas de material rejeitado conduz a alterações significativas na geoquímica da água intersticial e na mineralogia do material rejeitado ao longo do tempo. Temos, como exemplo, o caso de Mount Pleasant onde a oxidação de sulfuretos minerais, próximo da superfície do material rejeitado, levou à diminuição do pH e ao aumento da concentração de Sulfatos, As e de metais (Petrunic & Al, 2004).

Embora estas mudanças estejam altamente dependentes do local, têm-se realizado extensas pesquisas sobre os tipos de materiais rejeitados em causa, o que possibilita uma melhoria na compreensão dos processos geoquímicos que ocorrem nas acumulações de material rejeitado (Petrunic & Al, 2004).

No caso concreto da barragem de rejeitados considerada, foi considerado que os lixiviados produzidos na sua direta dependência, além de ácidos, apresentavam teores consideráveis em Urânio e Rádio em virtude da composição mineralógica do maciço explorado e subsequentemente dos rejeitados gerados. Uma abordagem integrada no campo, baseada em análises de um amplo conjunto de dados medidos em poços, furos e piezómetros permitem determinar a contaminação do solo e realizar uma subsequente avaliação da migração de radionuclídeos no ambiente de subsuperfície (Crançon & Mangeret, 2012).

A migração do urânio em solos contaminados tem sido investigada, em laboratório com base em dados colhidos em campo, através da modelação da termodinâmica e cinética de interações urânio-água-rocha. O comportamento do urânio em ambientes sub-superficiais está fortemente relacionado com a composição da matriz e geoquímica do solo, conduzida por interações água – rocha (Crançon & Mangeret, 2012).

O urânio é conhecido por interagir fortemente com os componentes orgânicos e minerais dos solos. O seu potencial de mobilidade é altamente condicionado pelas condições do meio. (Ragnarsdóttir & Charlet, 2000). Os seus depósitos de atividades mineiras na superfície do solo, continuamente expostos a fenómenos de meteorização, estão sujeitos à oxidação de U(0) em U(IV)/U(VI) (Haschke, 1998; Salbu *et al.*, 2003).

Os lixiviados de fragmentos óxidos de urânio, em consequência destas influências, produzem compostos altamente solúveis (McEachern & Taylor, 1998).

As investigações hidrogeoquímicas de rejeitados são importantes na compreensão de processos que possam ocorrer em barragens de rejeitados, sendo fundamental reconhecer as interações que ocorrem entre o sistema água-mineral. É igualmente relevante o conhecimento do comportamento destes locais em profundidade em termos de dinâmica com o fluxo subterrâneo de forma a verificar as relações do escoamento sub-subterrâneo em detrimento de alterações

composicionais devido a fenómenos de contaminação. Estas investigações incidem sobre todos os tipos de rejeitados mineiros produzidos a nível mundial.

As dificuldades inerentes à representação e modelação matemática de meios com elevados níveis de heterogeneidade têm conduzido a investigações, no sentido de alcançar resoluções para problemas ligados aos processos hidrogeológicos em maciços rochosos fraturados. Esta temática aprofunda-se, em termos práticos, consoante a extensão da área em causa, relativamente às suas necessidades de interpretação e de modelação dos fenómenos de escoamento. Assim, nos processos supracitados, é essencial proceder a um condicionamento dos escoamentos em relação ao grau de heterogeneidade de diferentes tipos de propriedades. Os modelos matemáticos passíveis de utilização, nestes casos, diferem entre si, no modo como a heterogeneidade pode ser modelada, ou seja, na forma como se procede ao condicionamento do escoamento e em como a informação no modelo pode ser tratada, diferenciando-se, neste contexto, a aplicação de técnicas determinísticas das de simulação estocástica. Os modelos em causa dividem-se em três categorias principais: contínuos equivalentes; de simulação de redes de fracturação discretas; obtidos por aplicação de técnicas híbridas (Barbosa, 2008).

No presente trabalho foram desenvolvidos modelos hidrodinâmicos condicionando-se o escoamento a certas heterogeneidades consideradas como representativas do meio recetor: o grau de alteração e o grau de fracturação do maciço rochoso, de natureza granítica, subjacente à barragem de rejeitados – individualizando-se diferentes unidades e atribuindo variações em certos parâmetros de acordo com as suas variações mais representativas possíveis de detetar até uma profundidade de aproximadamente 60 metros.

Através da análise exploratória de série de dados foi possível reconhecer o grau de contaminação e as suas evoluções em termos espaço-temporais, através da observação de tendências, identificando-se crescimentos ou diminuições de concentrações ao longo do tempo. Algumas das variabilidades detetadas podem ser cíclicas, em função da sazonalidade, podem apresentar uma tendência constante ou podem ter uma variação abrupta ao longo do tempo (Chandler & Scott, 2011).

A deteção e estimação de tendências é um processo bastante complexo devido aos problemas associados às características dos dados de contaminação. Estas podem estar relacionadas com a possível presença de fatores de sazonalidade, de assimetria (*skewness*), de correlação em série, existência de dados anormais, “*outliers*” e dados em falta, que não são amostrados (Hirsch et al., 1982; Hirsch e Slack, 1984). Por conseguinte, os testes estatísticos têm sido desenvolvidos para lidar com todo este universo de possibilidades (Mozejko, 2012).

Relativamente à deteção e estimação de tendências que podem estar presentes em variáveis de interesse para avaliação da qualidade da água, existem, atualmente, diferentes abordagens estatísticas. Estas vão desde simples correlações de dados a análises de regressão, análises de séries cronológicas e métodos estatísticos baseados em modelos não paramétricos (Mozejko, 2012). No presente trabalho procedeu-se à análise exploratória de dados (AED) piezométricos e hidroquímicos recorrendo-se a técnicas gráficas e de estatística univariada.

A análise exploratória de dados (AED) é uma técnica gráfica que permite efetuar um exame visual avançado dos dados sendo uma componente chave de qualquer análise estatística (Kundzewicz & Robson, 2004; Chandler & Scott, 2011).

A primeira aplicação da AED fundamenta-se na exploração dos dados de partida, de modo a identificar características principais, reconhecer problemas nos dados, como “*outliers*” e lacunas nos registos, nos padrões temporais (por exemplo, tendências ou mudanças abruptas dos dados e sazonalidade) e nos padrões regionais e espaciais.

Quando bem estudada e executada, a AED é uma poderosa ferramenta que pode eliminar a necessidade de uma análise estatística formal e que permite confirmar se um padrão observado é ou não significativo (Kundzewicz & Robson, 2004).

Na exploração de séries de dados de qualidade da água, a análise de suporte mais comum é baseada em histogramas, gráficos de probabilidade normal e quantil-quantil, gráficos de séries temporais, variogramas, diagramas de dispersão, *box plots* e gráficos de soma cumulativa.

A utilização destes gráficos deve permitir a identificação de características importantes dos dados. Em suma, permitem a avaliação visual de qualquer tendência ou mudança radical – sendo que a principal tendência será sempre relativa à variação geral (Mozejko, 2012).

### 1.3 Metodologia

A metodologia adotada para compreender a evolução temporal dos fenômenos hidroquímicos ocorridos na barragem e identificar os efeitos do processo de remediação é descrita pelas seguintes fases visíveis na figura 1.1.

Efetuada-se uma análise de séries temporais de resultados de monitorização da piezometria na barragem e respetivas zonas limítrofes.

Seguidamente foram elaborados modelos conceptuais - quase tridimensional e bidimensionais – interpretativos como representação esquemática e representativa da área da barragem. Nesta fase foram considerados princípios e pressupostos, para o desenvolvimento de um modelo de escoamentos.

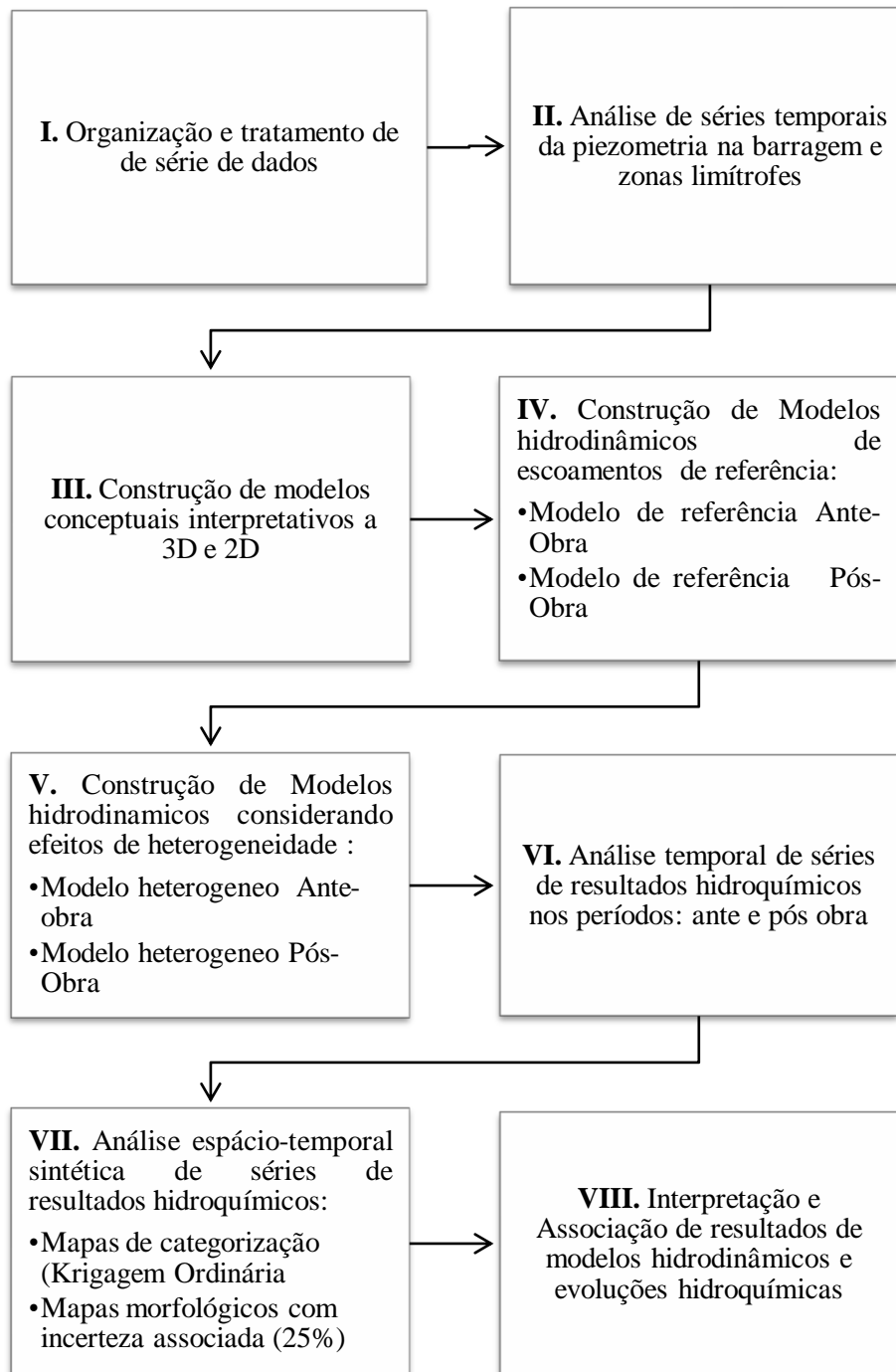
Com base nos pressupostos assumidos foram construídos modelos hidrodinâmicos interpretativos de referência da área, para dois períodos de tempo: ante e pós-obra.

Através do modelo interpretativo de referência foram criados modelos de escoamento, considerando efeitos de heterogeneidade do meio, a partir de informação de perfis geofísicos de resistividade elétrica, para os dois períodos de tempo.

Posteriormente foi feita uma análise de séries de resultados temporais nos períodos ante e pós-obra: pH e espécies químicas relacionadas com os fenômenos de contaminação em causa: Ra-226, Utotal, Sulfatos ( $\text{SO}_4^{2-}$ ), Manganês ( $\text{Mn}^{2+}$ ), Cálcio ( $\text{Ca}^{2+}$ ) e bicarbonatos ( $\text{HCO}_3^-$ ). Foram executados gráficos de estatísticos básicos: histogramas de frequência, *box-plots* e gráficos de dispersão temporal para cada piezómetro instalado no local.

Foi também realizada uma análise de séries espaço-temporais sintética. Para tal efeito, procedeu-se a um estudo geoestatístico das espécies químicas referidas, através da estimação dos valores do poluente na área da barragem, pelo método Krigagem normal ou ordinária (*Ordinary Kriging*). Após a execução da Krigagem foram criados mapas morfológicos, com uma incerteza associada de 25%.

Dos resultados da componente hidrodinâmica e hidroquímica foram feitas interpretações e associações dos fenômenos de escoamento com o comportamento das espécies químicas na barragem.



**Figura 1.1. Principais etapas da metodologia aplicada**

## **2 PRESSUPOSTOS DO CASO DE ESTUDO: ANTIGA BARRAGEM DE REJEITADOS MINEIROS**

Tendo em conta que a lei não abrangia a obrigatoriedade de práticas relativas a processos de reabilitação no final da vida útil das explorações, tornou-se comum o desmantelamento de instalações e o fecho completo de minas sem que se tivesse em conta o cumprimento efetivo das políticas e regulamentos sobre essa reabilitação (Carvalho *et al*, 2015).

Esta postura contribuiu para a vulnerabilidade das áreas de concessões mineiras e das suas instalações de processamento. Neste sentido, inúmeras áreas mineiras abandonadas e degradadas passaram a constituir passivos ambientais de grande impacto, provocando riscos para a saúde e afetando negativamente o ecossistema circundante.

Associada a estes riscos, emerge uma crescente consciencialização e preocupação ambiental. Segundo as orientações estabelecidas na lei de Bases do Ambiente (Lei nº 11/87, de 7 de Abril) e posteriormente consignadas no Plano Nacional da Política do Ambiente de 1995, passaram-se a constituir referências de enquadramento, do ponto de vista ambiental e da valorização do território, estabelecendo-se, desta forma, um impulso para o início da resolução de alguns destes problemas.

A EDM, com a publicação do Decreto-lei nº198-A/2001, passou a ser concessionária exclusiva do estado português responsável pela recuperação das áreas mineiras degradadas do país. Dotada de um extenso programa de reabilitação, o seu enfoque centra-se na recuperação ambiental de minas abandonadas aliada à sua respetiva monitorização e segurança e à eliminação de passivos ambientais.

Partindo do Decreto-lei nº198-A/2001, que estabelece o regime jurídico de concessão do exercício da atividade de recuperação ambiental das áreas degradadas, foram inventariadas 175 áreas mineiras consideradas degradadas, das quais 61 correspondem a minérios radioativos e 114 a sulfuretos polimetálicos, distribuídas por todo o território nacional.

As escombrelas e barragens de rejeitados destacam-se por se apresentarem como os maiores focos de contaminação presentes nas áreas mineiras constituindo um dos principais focos dos impactos legados pela indústria mineira.

Considerou-se para o caso de estudo que a barragem se encontra instaurada no Maciço Hespérico, num granito de idade hercínica, monzonítico, de duas micas, predominantemente biotítico, formado no final do Carbónico.

Sendo os terrenos de natureza granítica, apresentam relevos do tipo “caos de blocos”, constituídos por um aglomerado de blocos que sofreram erosão dos solos saibrosos que os envolviam, bem como blocos isolados, em geral correspondentes a monólitos de grandes dimensões. Optou-se, igualmente, por considerar um modelo de jazigo similar a alguns dos que foram explorados no passado em Portugal em que a estrutura é do tipo filoniano, encontrando-se o mesmo encaixado em granitos porfiróides, de grão médio a grosseiro, e com ocorrência frequente de fenocristais de feldspato. A mineralização principal é pechblenda.

A área é composta por dois aquíferos. O primeiro aquífero é hipodérmico, com espessura de 3 a 6 metros, constituído pelo solo residual e pela zona dos granitos alterados ou localizados na zona de decompressão. A infiltração das águas pluviais é facilitada pela constituição arenosa dos solos residuais. A faixa superficial de decomposição dos maciços graníticos executa uma regulação do escoamento subterrâneo, permitindo escoamentos difusos em profundidade e lateralmente. Ou seja, em relação à recarga do aquífero subjacente, fatores como a sazonalidade

## CAPÍTULO 2

da posição do nível freático, a baixa precipitação regional, a pouca espessura e a frequente caulinição do maciço, confere ao aquífero hipodérmico uma relevância insignificativa.

O outro aquífero em questão é dotado de maior profundidade, sendo fissurado e anisotrópico, com funcionamento por blocos. O escoamento e o armazenamento são executados pela intensa fracturação, concluindo que a condutividade hidráulica é regularizada pelas características das diáclases - abertura, preenchimento, continuidade e a conectividade.

Considerou-se, igualmente, que as ligações eventuais que ocorram entre os dois aquíferos serão muito localizadas devido à baixa permeabilidade do aquífero hipodérmico, e principalmente devido à existência das argilas de alteração granítica que funcionam como barreira ao fluxo por selarem superficialmente as fraturas presentes no maciço.

Os materiais depositados na barragem são de natureza heterogênea e de composição granulométrica variada. O corpo da barragem é composto por formações de material grosseiro intercalados por materiais de granulometria mais fina. Os materiais são, na sua grande maioria, siltes, siltes-argilosos, areias médias e areias finas.

A barragem apresenta problemas relacionados com águas ácidas em consequência da lixiviação ácida dos minérios. Com base no enquadramento geológico e geomorfológico e das características das águas ocorrem pequenas exsurgências de água ácida, geradas a partir das águas provenientes da barragem e controladas pelo diaclasamento da rocha granítica.

O local evidencia fraca qualidade química das águas de circulação sub-superficial apresentando concentrações anómalas em determinados elementos.

As obras de recuperação ambiental incluem a modelação da escombreira e seu reperfilamento, com o intuito da estabilização geomecânica dos taludes e a instalação de sistema de cobertura multi-camadas. A cobertura de rejeitados pelo sistema de multi-camada tem como finalidade isolar os resíduos do meio envolvente durante um intervalo de tempo suficientemente duradouro de modo a reduzir as quantidades de lixiviados ácidos produzidos, para assegurar o decaimento dos radionuclídeos de vida curta e para, no longo prazo, limitar a saída de radionuclídeos de vida longa.

Foram instalados sistemas de monitorização e envolvente (piezométricos, poços e furos) de forma a garantir o controlo de parâmetros químicos e radiológicos das águas superficiais e sub-superficiais

(vide

**Anexo**

**Confidencial**

**1).**



### 3 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

#### 3.1 Modelação Hidrogeológica

Os modelos são ferramentas que correspondem a representações simplificadas de uma situação real, baseando-se em observações, medidas *in situ* e em interpretações periciais dos locais em estudo. A aplicação de um modelo permite, neste sentido, sistematizar informações, funcionando como um instrumento de planeamento e previsão de situações reais.

Um modelo hidrogeológico é, por sua vez, uma representação de um sistema hidrogeológico subterrâneo natural, podendo incluir a natureza geoquímica da área em estudo (Feitosa *et al.*, 2008).

Segundo Anderson e Woessner (1992) a aplicação de modelos de águas subterrâneas poderá ter três objetivos: (a) Previsão, o que corresponde a um quadro de suposições das condições futuras, de acordo com determinadas ações; (b) Interpretativa, utilizada para o estudo da dinâmica do sistema e para a sistematização de informação; (c) Genérico, cuja finalidade é a análise de sistemas hidrogeológicos hipotéticos.

Os modelos podem ser demarcados em modelos de fluxo e em modelos de transporte de massa. Os precedentes são uma representação física ou numérica que executa simulações por meio de equações do escoamento da água, desenvolvido com base em registos ou informações dos fluxos naturais dos aquíferos, recargas e extrações ocorridas no aquífero.

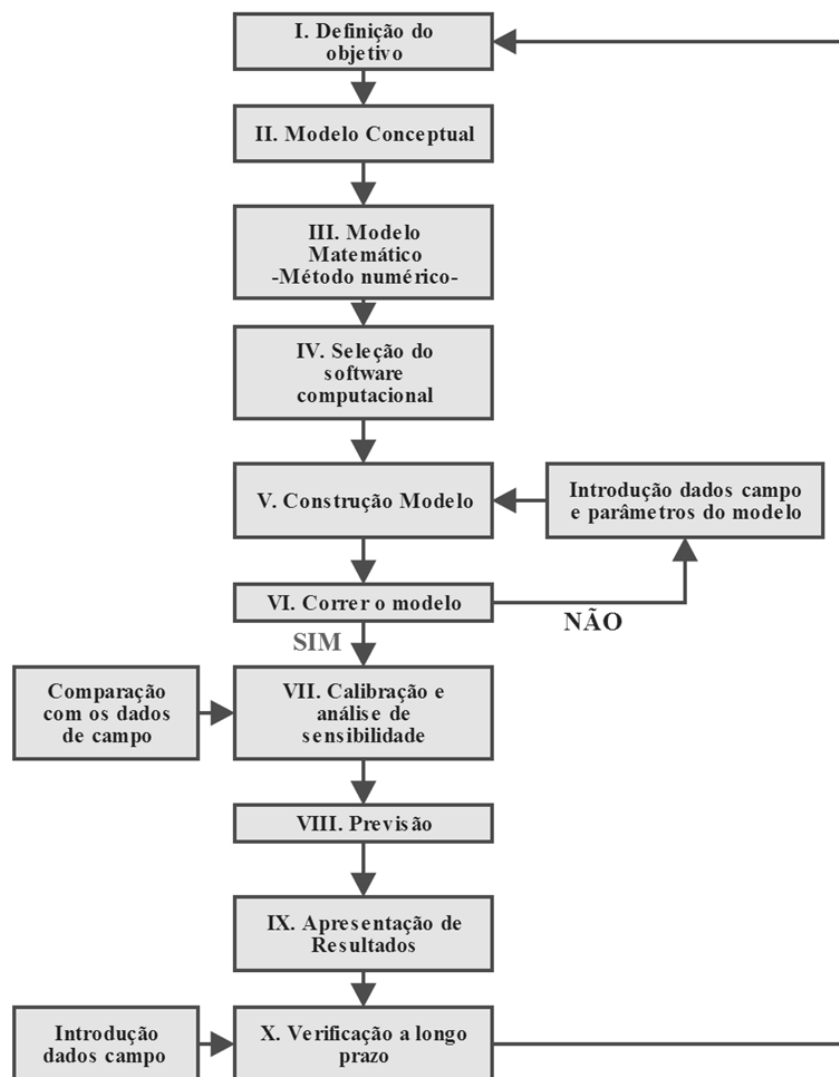
Os modelos de transporte de massa analisam o transporte e dispersão de uma substância poluente que atingiu um aquífero.

Relativamente aos tipos de modelo existentes, estes podem ser classificados como físicos ou matemáticos. Os modelos físicos simulam o fluxo de água subterrânea indiretamente, com base em leis, para representar processos físicos que ocorrem no sistema. Os modelos matemáticos podem ser classificados como analíticos ou numéricos. Os analíticos utilizam soluções matemáticas deduzidas para situações simplificadas e os numéricos dão uso a equações diferenciais do fluxo subterrâneo resolvido, utilizando para tal efeito técnicas de aproximação numérica, obtidas através da discretização do aquífero e da solução de um sistema de equações com as incógnitas obtidas desse processo (Feitosa *et al.*, 2008).

Atualmente os modelos hidrogeológicos mostram enormes potencialidades, por se apresentarem como ferramentas essenciais na avaliação do comportamento de um aquífero, de forma a exponenciar o conhecimento hidrogeológico. A sua grande importância reside na fomentação do planeamento e da gestão dos recursos hídricos (através da avaliação de políticas alternativas) e na sua capacidade de previsão de impactos no meio hídrico ou desenvolvimento de cenários.

Do ponto de vista ambiental, são fundamentais no apoio à resolução de questões de remediação ou recuperação ambiental, aliando-se a projetos e à otimização de soluções de eficiência económica de sistemas de remediação ambiental. Neste contexto, permitem executar uma avaliação quantitativa dos recursos hídricos, ou seja, a determinação das entradas e saídas de água no sistema, caudais de bombagem e processos de armazenamento nos aquíferos.

A modelação hidrogeológica envolve, portanto, várias etapas desde a definição do objetivo até a apresentação de resultados finais modelados, promovendo, por norma, uma análise contínua no tempo (Figura 3.1).



**Figura 3.1. Etapas na modelação (adaptado Anderson & Woessner, 1992)**

### **I. Definição do objetivo**

Estabelecer o objetivo do estudo na modelação constitui o primeiro passo para o desenvolvimento do modelo. É essencial identificar com clareza a finalidade da modelação, de forma a auxiliar o restante processo.

Deve-se, neste sentido, definir qual o objetivo no qual a modelação se vai focar e se o modelo construído constitui uma ferramenta de previsão, interpretação do sistema ou um exercício genérico de modelação, ou seja, quais as respostas que se procuram com o modelo em causa.

### **II. Modelo conceptual**

Após a definição dos objetivos da modelação procede-se à elaboração do modelo conceptual, como forma esquemática de representação simplificada dos principais fenómenos físicos do sistema e do seu comportamento. Este processo deve ser levado a cabo da forma mais precisa possível, com vista à implementação de um modelo numérico.

Este tipo de modelo é, na sua génese, uma interpretação pictórica do sistema de fluxo de águas subterrâneas e que incorpora todos os dados geológicos, hidrogeológicos e hidrológicos disponíveis num bloco de diagrama ou expressos através de um esboço ou desenho (Anderson e Woessner 1992).

Na elaboração de um modelo conceptual parte-se de uma idealização da realidade tendo como base pressupostos, segundo um princípio de simplicidade, retendo-se um grau de complexidade suficiente que permita a representação dos elementos físicos do sistema (Barreiras, 2009).

Nesta etapa, para compreender a natureza do modelo de forma a determinar as suas dimensões e distribuição do modelo numérico, devem ser observados os seguintes passos:

- ◆ Identificação do sistema aquífero;
- ◆ Definir estruturas hidroestratigráficas;
- ◆ Identificação das fronteiras do meio hídrico;
- ◆ Levantamento dos valores dos parâmetros hidrogeológicos;
- ◆ Levantamento das entradas e saídas de hídricas (recargas e descargas).

Para a elaboração de um modelo conceptual são necessárias informações sobre os parâmetros hidráulicos e variáveis da zona de estudo. A resposta do aquífero depende significativamente da variação espacial e temporal do aquífero, parâmetros hidráulicos, das condições de fronteira e pressões nesse mesmo aquífero. Nesse sentido, quanto mais precisos forem os parâmetros do aquífero, mais eficientes serão os modelos.

### **III. Modelos Matemáticos**

No contexto da modelação hidrogeológica utilizam-se os modelos matemáticos a partir de equações matemáticas, de condições iniciais e de fronteira para descrever o fenómeno físico em questão.

Os modelos matemáticos podem classificar-se como analíticos ou numéricos. Os modelos numéricos, por norma, utilizam o método das diferenças finitas ou o método dos elementos finitos.

Os modelos analíticos são aplicados nos casos menos complexos, ou seja, onde o escoamento é feito a uma ou duas dimensões e onde este adota características de homogeneidade.

Por vezes, é necessário efetuar simplificações de modo a representá-lo o mais homogeneamente possível. Este baseia-se na simplificação das equações na pesquisa de soluções exatas, a partir da equação diferencial.

Os modelos numéricos, na hidrogeologia permitem a simulação de possíveis cenários, para o desenvolvimento de um estudo de um sistema de águas subterrâneas. Neste sentido, sistematiza as informações reais de forma a dar resposta acerca do funcionamento de um aquífero, ou seja, executa a resolução das equações diferenciais com aproximação às respostas do sistema real.

A equação diferencial representa um modelo físico embora não descreva todas as condições. Devido a isto surge a necessidade de proceder à aplicação de condições adicionais, cujo objetivo é aproximar, o mais possível, a modelação à realidade. Uma das principais formas de promover esta aproximação é consumada a partir das condições fronteira no modelo de águas subterrâneas. É essencial uma atribuição certa destas condições para que não se induzam erros no sistema.

Entre os diversos métodos numéricos desenvolvidos há dois principais: método das diferenças finitas e método dos elementos finitos.

O método das diferenças finitas é o mais frequente na modelação numérica. Através deste método é possível obter soluções aproximadas da equação diferencial para uma série de localizações pontuais nas quais se discretizou o volume de estudo (Barreiras, 2009).

A escolha dos pontos é feita aleatoriamente, tanto em posição como em quantidade. A descrição do sistema é feita através de células, blocos ou elementos a cada um dos pontos no espaço, num sistema contínuo, representando uma porção limitada do aquífero a ser modelado.

Deste modo, os parâmetros atribuídos a uma dessas porções são considerados constantes para a região que ele representa, o que significa que quanto maior o número de pontos, mais próximo da realidade estará o modelo. Em hidrogeologia os modelos numéricos em diferenças finitas têm por objetivo o cálculo do valor da cota piezométrica em cada nó.

Geralmente, neste método, a região é aproximada por uma malha formada por retângulos. Os espaçamentos podem ser constantes, variar ao longo de cada eixo ou variar de um eixo para o outro. Em cada nó, cada derivada da função matemática do problema é aproximada por uma expressão algébrica com referência aos nós adjacentes.

A expressão algébrica utilizada para representar a variação em cada eixo pode ser do tipo diferença progressiva (a derivada é calculada utilizando o ponto em estudo e um ponto à frente), diferença regressiva (usa o ponto em estudo e outro atrás) e diferença central (usa um ponto na metade do intervalo à frente e outro na metade do intervalo atrás) (Feitosa, *et al.*, 2008).

$$\text{Diferença progressiva: } \frac{dh}{dx} \approx \frac{h_{i+1} - h_i}{\Delta x}$$

$$\text{Diferença Regressiva: } \frac{dh}{dx} \approx \frac{h_i - h_{i-1}}{\Delta x}$$

$$\text{Diferença central: } \frac{dh}{dx} \approx \frac{h_{i+\frac{1}{2}} - h_{i-\frac{1}{2}}}{\Delta x}$$

De acordo com a posição onde se colocam os pontos a serem utilizados na análise numérica, a localização dos nós na malha pode ser centrada no meio das células ou nas esquinas das células. Em relação ao estudo de água subterrânea, a malha centrada no meio das células é geralmente preferida, visto que a partir desta a programação computacional pode ser feita de forma mais eficiente.

O Método dos Elementos Finitos inicia-se com a discretização do espaço em subdomínios denominados de elementos finitos. Os nós encontram-se ao longo da fronteira de cada região e cada parâmetro é identificado com um nó específico.

O fundamento dos Elementos Finitos consiste em substituir a equação diferencial de fluxo por uma função  $\Omega(h)$  definindo para cada  $h_i$  (nível piezométrico) no domínio de estudo. A função  $h$  que minimiza  $\Omega(hn)$  é a solução do problema (Barreiras, 2009).

### IV. Seleção do *software* computacional

O código (programa de computador) é um conjunto de comandos ou equações algébricas gerados através da aproximação diferencial parcial de equações usadas para resolver um modelo matemático. Técnicas de aproximação, como o método de diferenças finita ou de elementos finitos permitem compreender e gerir o sistema aquífero de forma a fazer previsões do sistema (Anderson & Woessner, 1992).

## V. Construção do modelo

A construção do modelo passa por pôr em prática os resultados da conceptualização, notabilizar os objetivos e demonstrar a complexidade do modelo. Para isso é necessário conhecer detalhadamente o contexto hidrogeológico do local em que o modelo vai ter efeito. Os dados necessários são do tipo físico e do tipo hidrogeológico.

Os dados físicos correspondem à geometria do aquífero incluindo a sua extensão e espessura. Os dados hidrogeológicos incluem informações sobre porosidade, condutividade hidráulica, cargas hidráulicas, fluxos e coeficientes de armazenamento. Para a definição da geometria o modelador poderá recorrer a perfis litológicos disponíveis, obtidos por meio de sondagens diretas, mapas e perfis geológicos, mapas de contorno estrutural, entre outros. Somente através da análise das informações obtidas por estes meios é que se poderá definir a área de ocorrência e a forma do aquífero, a sua profundidade, a sua espessura, entre outras características do mesmo.

Os parâmetros hidrodinâmicos do aquífero, transmissividade, armazenamento e condutividade hidráulica são obtidos por meios de testes ao aquífero. Os valores dos parâmetros têm que ser inseridos no modelo, sendo baseados nos dados disponíveis que provêm de trabalhos de campo e de literatura especializada.

De seguida, expõem-se de forma breve as configurações e atribuições necessárias para a construção do modelo.

É necessário dimensionar a malha do local em estudo. A malha do modelo numérico delimita e cria uma partição para a área em estudo. A dimensão das células é um critério definido *a priori* dependendo do detalhe com que se pretende configurar o modelo da dimensão da área de estudo e o tempo de execução do modelo. O refinamento da malha é aplicado em locais de maior interesse e onde é expectável um maior gradiente hidráulico (zonas de rio ou pontos de descontinuidade geológica ou hidrológica).

As condições de fronteira são constrangimentos impostos na malha que representa a interface entre o domínio do modelo e o ambiente circundante.

O tipo de fronteira selecionada deve ser consistente com o modelo conceptual e com o balanço hídrico, devendo ser localizada e orientada consistentemente com os fenómenos físicos que representa.

As condições de fronteira devem ser desenhadas de modo a tirar partido máximo das fronteiras físicas ou hidráulicas. As fronteiras físicas, normalmente, relacionam-se com a presença de formações geológicas ou com um corpo significativo numa superfície subterrânea ou sub-superficial. As fronteiras hidráulicas são o resultado das condições hidrológicas onde se notabilizam divisões de águas subterrâneas ou linhas de fluxo (Barreiras, 2009).

Tabela 3.1. Tipos de fronteiras dos modelos

Tipo de Fronteira	Designação Matemática	Pressupostos
1. Piezometria específica <u>Dirichlet</u>	$h = (x, y, z, t)$ $= \text{constante}$	Os valores de grandeza de níveis piezométricos no sistema são conhecidos e podem ser utilizados para o cálculo dos pontos internos. Por exemplo, um rio, lago ou corpos de água com conexão com um aquífero.
2. Escoamento específico <u>Neumann</u>	$\frac{dh(x, y, z, t)}{dn}$ $= \text{constante}$	O gradiente é conhecido apenas na fronteira, sendo neste caso, o caudal conhecido ao longo da superfície de limite da área de escoamento observado.  O gradiente normal na fronteira é considerado nulo, num contacto impermeável, numa linha de simetria ou numa linha de corrente, ou de fluxo. Não é considerado nulo quando, através do conhecimento do gradiente hidráulico, existem condições de avaliação do fluxo.
3. Escoamento de altura piezométrica dependente <u>Cauchy</u>	$\frac{dh}{dn + ch}$ $= \text{constante}$	A fronteira atravessada pelo caudal depende do nível piezométrico. É uma combinação linear das duas anteriores e ocorre em limites semipermeáveis, que são representados matematicamente por uma combinação linear da carga hidráulica e do fluxo.

## VII. Calibração e análise de sensibilidade

A calibração de um modelo é uma etapa fundamental, mas não suficiente, para que o modelo represente previsões o mais próximo da realidade. A calibração do modelo é influenciada pela incerteza, devido à dificuldade de definir a distribuição espacial e temporal exata dos valores de parâmetros no domínio do problema.

De outra forma, é visto como uma fase de ajuste das variáveis independentes (parâmetros e fluxos) do modelo para que os dados simulados convirjam com os dados reais e dessa forma possibilitem a compreensão da relação dos resultados com os parâmetros de partida.

Os métodos de calibração efetuam o ajustamento dos valores desconhecidos (ou com incerteza associada) até que se encontre a melhor solução, ou seja, uma que corrobore com a informação conhecida.

Este processo pode envolver a otimização da parametrização do modelo, das propriedades hidráulicas, das condições fronteira e a configuração de novos modelos conceptuais.

A calibração induz ainda uma análise de sensibilidade das variáveis e parâmetros do modelo, que deve ser considerada na avaliação da respetiva importância relativa. Uma análise de sensibilidade é executada em ordem do efeito de incerteza do modelo calibrado (Barreiras, 2009).

## VIII. Previsão

Corresponde à quantificação da resposta do sistema aos eventos futuros, fornecendo a resposta para compreender o funcionamento do sistema aquífero.

## X. Verificação a longo prazo

Tal como a própria nomenclatura indica, baseia-se na atualização do modelo com novas informações. É importante uma contínua monitorização e a repetição sistemática das simulações ao longo do tempo, à medida que novos dados de campo sejam obtidos, o que possibilita a correção de possíveis imprecisões da modelação.

### 3.1.1 Princípios fundamentais do escoamento da água subterrânea

#### Equações fluxo de águas

Em quase todos os campos da ciência as técnicas de análise são baseadas na compreensão de processos físicos, e na maioria dos casos, é possível descrever estes processos matematicamente. Os sistemas de águas subterrâneas não são exceção.

O movimento das águas subterrâneas é regido por princípios hidráulicos estabelecidos. O fluxo através dos aquíferos, na sua maioria são meios porosos naturais, possuem energia mecânica, térmica, e diferentes formas químicas. As quantidades de energia variam espacialmente, forçando as águas subterrâneas a movimentarem-se de um ponto para outro na tentativa da natureza eliminar essas diferenças de energia. O fluxo de águas subterrâneas é, portanto, regido pelas leis da física e da termodinâmica.

#### Generalização da lei de Darcy

As equações matemáticas que descrevem o fluxo de águas subterrâneas, através de um meio poroso, são baseadas principalmente na Lei de Darcy.

A Lei de Darcy conforme desenvolvida inicialmente, aplicava-se a escoamentos unidimensionais. No entanto pode ser generalizada para escoamentos multidimensionais, tal como se pode exemplificar através da prática com o fluxo de águas subterrâneas em duas ou três direções nos aquíferos.

$$q = \frac{Q}{A} = K \frac{\Delta h}{L} \quad \rightarrow \quad q = -K \text{grad} h \quad [\text{Eq. 3.1}]$$

Representa-se, aqui, **q** como o vetor velocidade aparente, formado por componentes nas três direções principais de anisotropia (*X, Y, Z*), **K** o tensor de condutividade hidráulica e **grad h** o gradiente de carga hidráulica, que indica como varia a carga hidráulica ao longo de cada uma das direções. O sinal negativo indica que o fluxo da água ocorre no sentido dos potenciais decrescentes, ou seja, no sentido contrário ao gradiente de **h** (Feitosa, *et al.*, 2008).

#### Equação da continuidade (Conservação da Massa de água)

Através da equação da continuidade, a quantidade de água que entra e sai de um bloco unitário de solo é constante, não existindo perdas de fluxos neste elemento unitário. Esta equação é indicativa de que a água pode apenas ser transportada de um ponto para o outro e armazenada em algum lugar.

$$\frac{\partial \eta \rho V_x}{\partial x} + \frac{\partial \eta \rho V_y}{\partial y} + \frac{\partial \eta \rho V_z}{\partial z} = - \frac{\partial \eta \rho}{\partial t} \quad [\text{Eq. 3.2}]$$

Os três primeiros elementos da equação indicam a quantidade de água que entra no sistema em cada uma das direções dos eixos principais e o segundo membro indica a variação do armazenamento no local.

**Equação geral do fluxo subterrâneo**

Aplicando a Lei de Darcy (para o caso tridimensional), na equação de continuidade:

$$\operatorname{div}(\eta \rho v) = -\frac{\partial \eta \rho}{\partial t} \quad [\text{Eq. 3.3}]$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) + Rv = Se \frac{\partial h}{\partial t} \quad [\text{Eq. 3.4}]$$

Onde,

$Rv$ : Taxa de recarga por unidade de volume

$Se$ : Armazenamento específico

$Rv$  é positivo se a água entra no sistema e negativo se a água sai do sistema

**3.2 Análise Geoestatística**

A geoestatística procura caracterizar a dispersão no espaço e no tempo das grandezas que definem a quantidade e a qualidade dos recursos naturais. Para tal, utilizam-se instrumentos estatísticos que quantificam a continuidade espacial da grandeza do objeto em estudo (Soares, 2014).

Os modelos geoestatísticos para a modelação de fenómenos espaciais resultam da associação entre a componente naturalista, referente às disciplinas dos diferentes domínios, onde se estudam formalmente aqueles fenómenos (geologia, hidrogeologia, etc) e os fundamentos teóricos da matemática e da estatística, em particular da teoria das funções aleatórias (Soares, 2014).

A carência de informação e a variabilidade dos fatores que estão na génese dos fenómenos constituem-se como as principais razões para a dificuldade em clarificar as principais dúvidas em relação a estes fenómenos. É neste ponto que reside a importância da geoestatística, promovendo a caracterização dos fenómenos espaciais naturais e a quantificação da incerteza do seu conhecimento através da teoria das funções aleatórias, criando modelos e adaptando-os às diferentes realidades de cada caso de estudo específico. (Soares, 2014)

A validade dos modelos geoestatísticos está, naturalmente, permeada pela relação entre o mundo real e os fenómenos naturais e, como tal, as condições específicas do fenómeno que está a ser estudado serão o fator determinante para a legitimação da eficácia dos modelos em causa. Este quadro possui como base alguns princípios orientadores da prática geoestatística e, por isso mesmo, tal como anteriormente referido, não é conveniente considerar a existência de um modelo universalmente aceite, já que as condições específicas de cada situação determinarão a qualidade do modelo utilizado (Soares, 2014).

**3.2.1 Estimador linear geoestatístico: Krigagem**

O estimador geoestatístico por Krigagem é um método desenvolvido por Matheron G., 1965, que assenta num modelo de variograma, indicativo das principais características estruturais e de homogeneidade do atributo no local específico onde se aplica a estimação. Funciona como uma medida de continuidade e homogeneidade estrutural do processo espacial do qual conhecemos apenas um conjunto de dados amostrados (Soares, 2014).



O estimador linear geoestatístico denominado de Krigagem normal é definido nos seguintes termos:

$$[Z(x_0)]^* = \sum_{\alpha=1}^N \lambda_{\alpha} Z(x_{\alpha}) \quad [\text{Eq. 3.5}]$$

A Krigagem simples é um algoritmo de krigagem, em que se assume o conhecimento das médias do conjunto de variáveis aleatórias referentes aos valores amostrados e aos pontos no espaço não amostrados. É aplicado nos casos em que é necessário o conhecimento da média da função aleatória ou quando se conhece razoavelmente a tendência do fenómeno.

É de referir que a Krigagem simples tende a atenuar os valores estimados em torno da média conhecida pois não reproduz facilmente as variações locais de  $Z(x)$ .

### 3.2.2 Formalismo da indicatriz

#### Krigagem normal da indicatriz

$$I_z(x) = \begin{cases} 1 & \text{se } Z(x) < z \\ 0 & \text{se } Z(x) \geq z \end{cases} \quad [\text{Eq. 3.6}]$$

Em qualquer ponto  $x_0$  de A, a variável  $I_z(x_0)$  pode ser interpretada como a probabilidade de o valor de  $Z(x_0)$  ser inferior a  $z$ :

$$I_z(x_0) = \text{prob} \{Z(x_0) < z\}$$

Assim, o valor  $I_z(x_0)$  pode ser estimado por krigagem normal através da combinação linear dos valores  $I_z(x_{\alpha})$  das amostras vizinhas a  $x_0$ :

$$[I_z(x_0)]^* = \sum_{\alpha} \lambda_{\alpha}(z) I_z(x_{\alpha})$$

### 3.2.3 Morfologia geoestatística

A forma dos corpos é um fator que intervém diretamente na sua quantificação e na dispersão das características internas de um fenómeno espacial sendo determinante na avaliação da interação com outros sistemas. Sendo esta definida por variáveis qualitativas torna-se necessário atribuir uma classificação ou divisão por categorias (Soares, 2014).

Para o desenvolvimento da morfologia geoestatística é importante definir os seguintes pontos:

- i) A forma de um corpo é definida através do formalismo da indicatriz, pelos pontos de maior probabilidade de pertença a esse corpo;
- ii) A forma final de um corpo resulta da classificação das probabilidades estimadas nas categorias previamente definidas nas amostras ou observações.

### 3.2.4 Zonas de incerteza morfológica

Pelo formalismo de estimação morfológica é possível identificar zonas de incerteza, em torno das estimadas e diretamente ligadas à variabilidade morfológica local. Contudo, o cálculo destas incertezas só indica a geometria do conjunto constituído pelas amostras condicionantes e o ponto a estimar sem ter em conta o valor das amostras e da sua variabilidade (Soares, 2014).



## 4 CASO DE ESTUDO

### 4.1 Introdução

Em termos hidrodinâmicos procedeu-se à modelação das condições associadas aos escoamentos das águas subterrâneas e sub-superficiais através da construção de um modelo matemático numérico a partir de dados físicos e de interpretações hidrogeológicas a modelar com o intuito de compreender a dinâmica dos escoamentos ocorridos na barragem.

Foram avaliados os parâmetros de qualidade das águas subterrâneas da barragem, temporalmente e espacialmente, através de métodos estatísticos univariados e de modelação geoestatística, com base na informação de monitorizações hidroquímicas de piezómetros instalados na área da barragem.

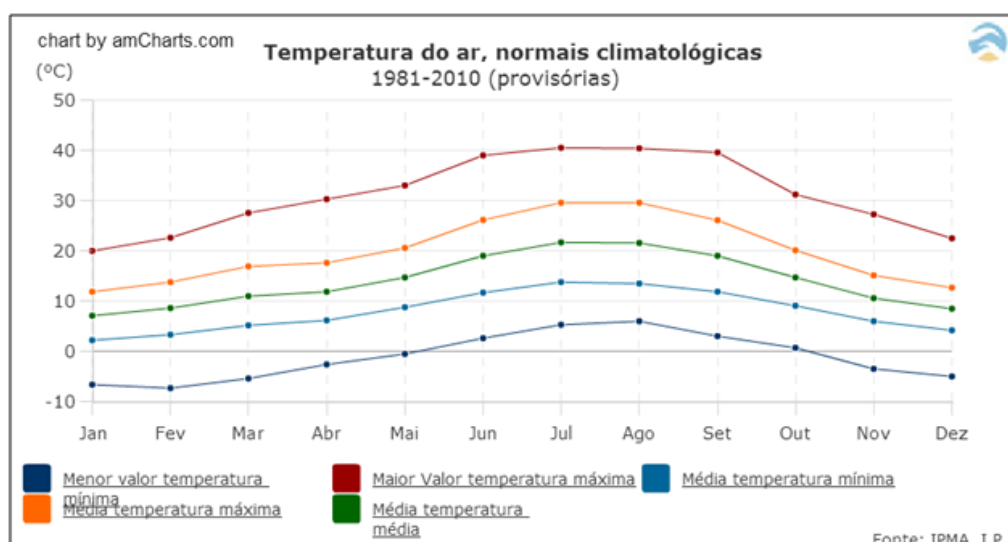
### 4.2 Climatologia e Cálculo do Balanço Hídrico

De acordo com os dados da Organização Meteorológica Mundial (OMM), os valores médios que caracterizam o clima de determinado local dependem do intervalo de tempo analisado, sendo, portanto, essencial utilizar séries longas de dados para estudar as tendências do clima de determinada área.

A OMM indica que o período de tempo de 30 anos corresponde a um intervalo suficientemente longo para que o mesmo seja representativo do local considerado.

Os dados de partida utilizados para o cálculo do balanço hídrico foram a precipitação média mensal (fonte: SNIRH) e a evapotranspiração potencial de uma estação local localizada a Norte do rio Mondego (estação de referência).

A evapotranspiração potencial foi calculada pelo método empírico de Thornthwaite onde a primeira variável utilizada foi a temperatura diária média mensal do ar da estação de referência, obtida segundo os dados disponíveis no Instituto Português do Mar e da Atmosfera (Gráfico 4.1.).



**Gráfico 4.1. Valores de temperatura mínima, média e máxima mensal do ar nos períodos de 1981 a 2010 (Fonte: IPMA)**

## CAPÍTULO 4

Através da temperatura diária média mensal foi possível calcular o índice de calor mensal (i), segundo a fórmula:

$$i = \left( \frac{t}{5} \right)^{1.514} \quad [\text{Eq.4.1}]$$

E o índice de calor anual (I), através do somatório dos índices de calor mensal calculados em [Eq.4.1]

$$I = \sum i \quad [\text{Eq.4.2}]$$

De seguida foi calculada a evapotranspiração potencial média em mm/dia pela seguinte fórmula:

$$\varepsilon = 16 \cdot \left( 10t/I \right)^a \quad [\text{Eq.4.3}]$$

Onde:

t = Temperatura diária média mensal

I = Índice de calor anual

a =  $675 \cdot 10^{-9} I^3 - 771 \cdot 10^{-7} I^2 - 1972 \cdot 10^{-5} I + 0,42239$  ou valor tabelado

Por fim, tendo em conta a duração real do mês e do número máximo de horas de sol, segundo a latitude do local, calculou-se a evapotranspiração potencial (ETP). Para o efeito aplicou-se a seguinte fórmula:

$$ETP = K \cdot \varepsilon \quad [\text{Eq.4.4}]$$

Onde, K, fator de ajuste em função da latitude e mês do ano é calculado pela seguinte forma:

$$K = \frac{N}{12} \cdot \frac{d}{30} \cdot d \quad [\text{Eq. 4.5}]$$

N = Número máximo de horas de sol segundo a latitude. No presente caso foi considerada a latitude da localização da estação: 40° 38' N (tabela **Anexo I**)

d = Número de dias do mês

$\varepsilon$  = Evapotranspiração potencial média calculada anteriormente (tabela **Anexo II**)

**Tabela 4.1. Cálculo da Evapotranspiração Potencial**

	T (°C)	i	I	$\varepsilon$	N	d	K	ETP
<b>Janeiro</b>	7.1	1.70	60.07	0.7	9.7	31	25.89	18.13
<b>Fevereiro</b>	8.6	2.27		0.9	10.6	28	23.08	20.78
<b>Março</b>	11.0	3.30		1.1	12	31	32.03	35.24
<b>Abril</b>	11.9	3.72		1.3	13.3	30	33.25	43.23
<b>Mai</b>	14.7	5.12		2	14.4	31	38.44	76.88
<b>Junho</b>	19.0	7.55		2.8	15	30	37.5	105
<b>Julho</b>	21.7	9.23		3.4	14.7	31	39.24	133.42
<b>Agosto</b>	21.6	9.16		3.3	13.7	31	36.57	120.69
<b>Setembro</b>	19.0	7.55		2.8	12.5	30	31.25	87.5
<b>Outubro</b>	14.7	5.12		2	11.2	31	29.9	59.8
<b>Novembro</b>	10.6	3.12		1.2	10	30	25	30
<b>Dezembro</b>	8.5	2.23		0.9	9.4	31	25.09	22.58

O intervalo de tempo em que foi calculada a ETP (1981-2010), não coincide com os dados de precipitação média mensal disponível, pois os dados da estação meteorológica terminam no ano de 2007.

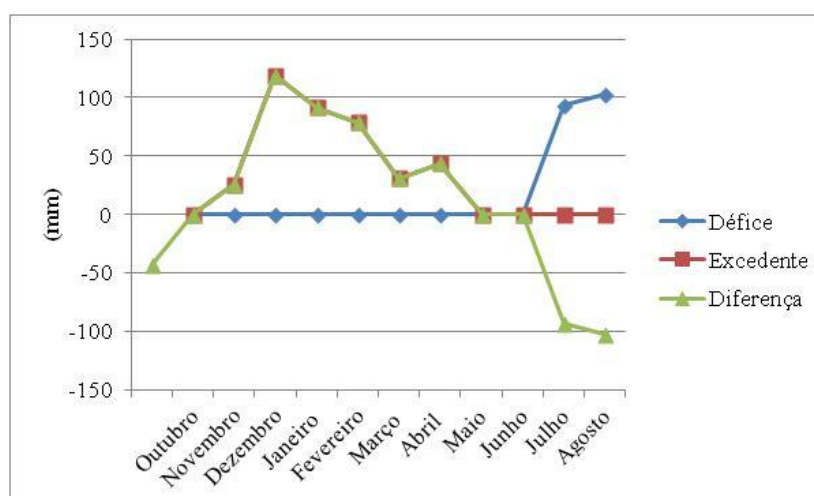
De forma a solucionar esta discordância, e para perfazer os 30 anos das normais climatológicas, foi determinada a precipitação média mensal num período anterior a 1981, tendo sido neste caso escolhida o seguinte: de 1978 a 2007.

Esta alteração não irá refletir mudanças reais significativas, visto que a evapotranspiração potencial apresentada é um parâmetro mais conservativo relativamente à precipitação.

Para o cálculo do balanço hídrico sequencial mensal considerou-se o mês de setembro como o início do ano hidrológico. Apontou-se, também, uma capacidade máxima de água retida no solo (CC) de 100 mm, pelo facto de se tratar de uma região com uma espessura considerável de solo e vegetação moderada.

**Tabela 4.2. Cálculo do Balanço Hídrico mensal em mm**

Mês	Precipitação	ETP	Reserva água no solo ( $\Delta R$ )	CC	ETR	Défice	Excedente
Outubro	103.9	53.8	50.1	50.1	53.8	0	0
Novembro	102.8	27.5	49.9	100	27.5	0	25.4
Dezembro	139.5	20.1	0	100	20.1	0	119.4
Janeiro	109.6	18.1	0	100	18.1	0	91.5
Fevereiro	99.6	20.8	0	100	20.8	0	78.8
Março	66.1	35.2	0	100	35.2	0	30.9
Abril	87.1	43.2	0	100	43.2	0	43.9
Maio	62.8	69.2	6.4	93.6	69.2	0	0
Junho	32.2	101.3	69.2	24.5	101.3	0	0
Julho	15.5	133.4	24.5	0	40.1	93.3	0
Agosto	17.8	120.7	0	0	17.8	102.9	0
Setembro	44.2	87.5	0	0	44.2	43.3	0
TOTAL	881.0	730.8	–	–	491.3	239.6	389.8



**Gráfico 4.2. Excedentes e Défices mensais**

Da análise da tabela 4.1., verifica-se que durante o intervalo de tempo em estudo, a média da temperatura anual foi de 14,0°C e os valores médios mensais, máximo e mínimo, foram de 21,7 °C e 7,1 °C, ocorrendo nos meses de julho e janeiro, respetivamente.

A precipitação média anual da região da estação de referência foi de 73,42 mm. Os valores médios máximo e mínimo de 139,5 mm e de 15,5 mm, correspondentes, respetivamente, aos meses de dezembro e julho (Tabela 4.2).

Os resultados da Tabela 4.2. e Gráfico 4.2. demonstram que entre os meses de novembro e abril, inclusive, resultam excedentes - período correspondente à época das chuvas. Os restantes meses do ano hidrológico revelam défices, com um máximo de 102.9 mm no mês de agosto.

### **4.3 Análise sintética de séries temporais de dados piezométricos**

*(vide Anexo Confidencial 2)*

### **4.4 Modelação hidrodinâmica dos escoamentos na área da barragem**

#### **4.4.1 Princípios e Pressupostos dos modelos numéricos desenvolvidos**

Após a definição do problema e dos objetivos da modelação, procedeu-se à criação do sistema de fluxo de águas da barragem, traduzindo-o sob a forma de modelos numéricos. Para isso, inicialmente, foi elaborado um modelo conceptual, esquemático e representativo do sistema hidrogeológico a modelar. Nesta fase foram considerados princípios e pressupostos a aplicar na criação do modelo de fluxo.

Na prática, face aos dados e informações quantitativas disponíveis da área a modelar, optou-se por considerar, para a construção de modelos numéricos de base, interpretativos uma série de pressupostos previamente ponderados e estabelecidos.

Para isso foi necessário conceptualizar o modelo como forma esquemática de representação dos possíveis sistemas aquíferos. Esta tradução teve que ser executada com a maior precisão possível, apoiando-se, para tal, na geometria da área, nas suas componentes naturais e nas suas características intrínsecas.

Para a construção de um modelo conceptual é necessário definir a estrutura geológica da área de estudo. Através da construção do quadro geológico é possível definir um quadro hidrogeológico que permita identificar os limites do sistema hídrico, as diferentes hidrofacies, efetuar o reconhecimento de recargas e a definir um sistema de fluxo.

Esses dados são classicamente obtidos a partir da informação geológica, incluindo mapas geológicos, registos de poços e furos, seções transversais, geofísica e mapeamento de campo adicional (Tabela 4.3).

Tabela 4.3. Síntese de recolha de informação para a construção do modelo

Dados para construção modelo	Aspetos a definir	Recolha de Informação
<b>Malha</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>♦ Dimensões do modelo a 2-D (extensão horizontal e vertical da área de estudo)</li> <li>♦ N° linhas</li> <li>♦ N° colunas</li> <li>♦ Localização de furos</li> <li>♦ Localização de linhas de água</li> </ul>	<i>(vide Anexo Confidencial 3)</i>
<b>Geologia e hidrogeologia</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>♦ Unidades geológicas</li> <li>♦ Tipos de aquífero</li> <li>♦ Processos de recarga e descarga</li> <li>♦ Mecanismos de escoamento</li> </ul>	
<b>Geometria</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>♦ Profundidade e espessura de unidades aquíferas</li> <li>♦ Topografia de cada camada: topo e base</li> </ul>	
<b>Condições de Fronteira</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>♦ Zonas impermeáveis</li> <li>♦ Zonas de caudal constante</li> <li>♦ Zonas de caudal específico</li> </ul>	
<b>Condições Iniciais</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>♦ Níveis piezométricos</li> </ul>	
<b>Parâmetros do aquífero</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>♦ Condutividade vertical e horizontal</li> <li>♦ Porosidade efetiva</li> <li>♦ Recarga aquífera</li> <li>♦ Transmissividade</li> <li>♦ Anisotropia</li> </ul>	

Em termos conceituais e de acordo com a análise da informação disponível, considerou-se os seguintes pressupostos e a ocorrência das seguintes entidades principais a modelar e tidas como relevância na modelação dos fluxos:

### 1. Unidades que compõem o modelo:

O modelo original é composto por duas camadas, uma primeira, composta essencialmente por “*tailings*” mineiros, com alternância de granulometrias que variam entre areias de diferentes calibres, siltes, lenticulas de natureza argilosa e precipitados de origem química de granulometria muito fina (Layer 1), e uma segunda camada subjacente ao corpo da barragem de rejeitados, constituída por um maciço rochoso granítico (Layer 2).

Segundo informação de sondagens e perfis geofísicos de resistividade elétrica foi possível constatar que a camada de natureza granítica apresenta níveis de alteração consideráveis diminuindo o seu estado de alteração em profundidade. O estado de alteração do maciço rochoso varia entre  $W_3$  e  $W_5$ , o que significa que em certos locais a rocha encontra-se muito alterada e decomposta, passando para níveis moderadamente a pouco alterados em níveis mais profundos.

Desta forma, na camada constituída pelo maciço rochoso subjacente ao corpo da barragem de rejeitados, foi possível esboçar a existência de dois níveis de distintos graus de alteração e fracturação, e por sua vez, executar modelos de fluxo considerando as heterogeneidades do meio. Numa fase posterior, foi ainda efetuada a distinção do maciço em duas camadas distintas com diferentes níveis de alteração, que vieram a configurar um modelo com três camadas.

É ainda de referir que a primeira camada é dotada em 4 pontos no interior da barragem por poços com desenvolvimento em todo o corpo do aterro a partir dos quais se realizava a deposição dos rejeitados, denominados de “*cachimbos*” (Figura 4.1)

Foi ainda considerada na modelação a existência de zonas de circulação preferencial dadas pelas maiores densidades de fracturação local e maior alteração e que, na realidade, se localizam e apresentam uma configuração muito próxima às das ribeiras que circulavam localmente no terreno em que os materiais rejeitados vieram a ser depositados. Estas antigas linhas de água que drenavam diretamente para a Ribeira local e podem ser observadas a partir da cartografia de 1942 foram assim consideradas na modelação no topo dos granitos subjacentes sendo modeladas como drenos.

### 2. Entradas (inflow) e saídas (outflow) do modelo e condições fonteira

Para a situação ante-obra, as entradas de água são feitas através da recarga superficial por efeito de precipitação e por escoamentos ocorridos lateralmente na camada granítica.

A zona dos cachimbos e as linhas de água subjacentes, anteriormente referidos, são também locais preferenciais de escoamento de água, funcionando como drenos.

As saídas de água são realizadas lateralmente através do maciço granítico e preferencialmente através destas linhas de água.

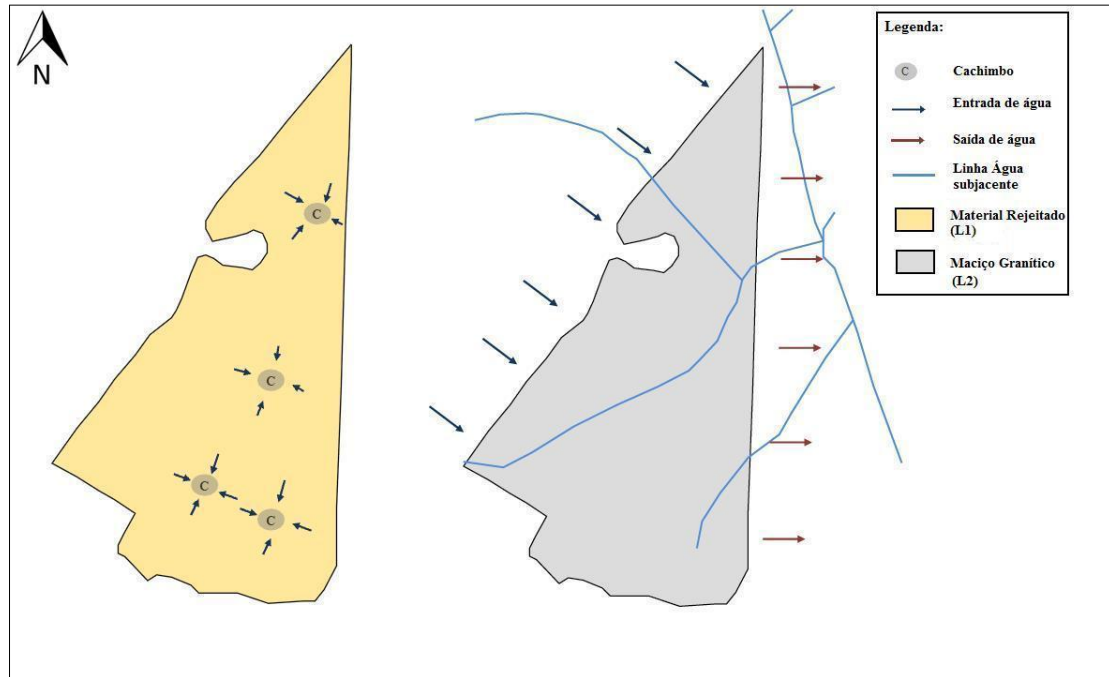
Para a situação pós-obra, as entradas e saídas de água continuam a funcionar da mesma forma, à exceção da recarga por precipitação que neste caso será nula devido às obras de requalificação, que implicaram a selagem da camada superficial através da instalação do sistema de multicamada, conduzindo ao isolamento e impermeabilização da barragem.

Para o presente caso foram construídos modelos conceituais, quase tridimensional e bi-dimensional como representação esquemática da área da barragem. Os modelos do tipo quase-

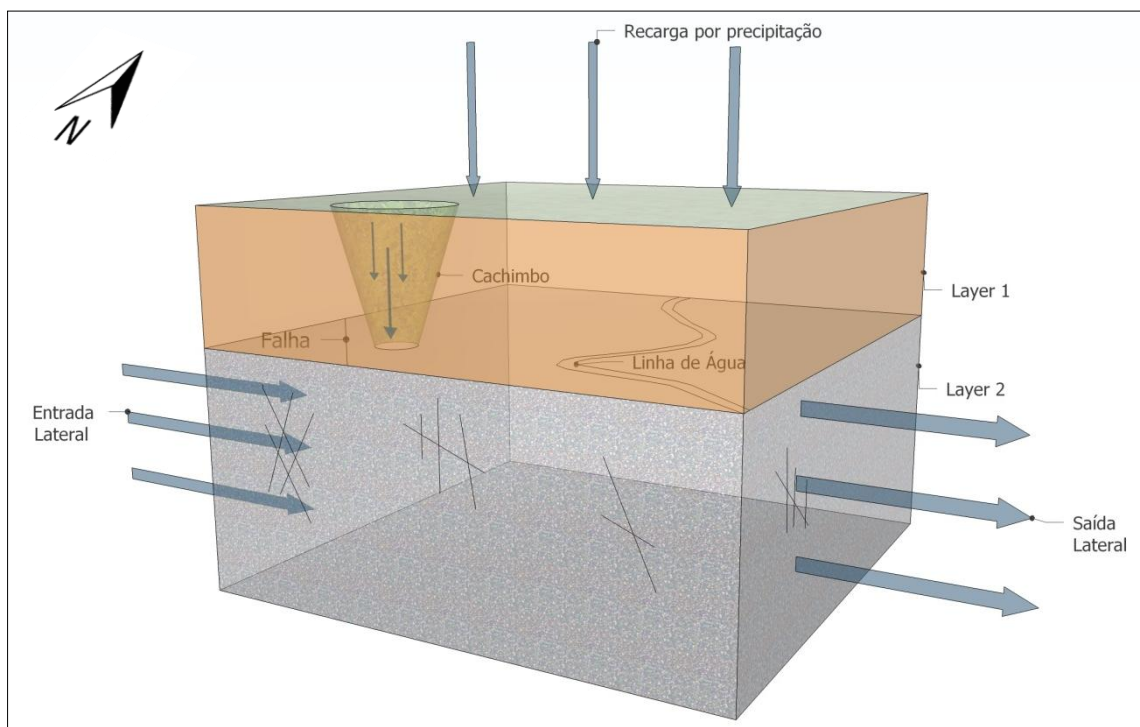


tridimensional simulam uma sequência de aquíferos sobrepostos com intercalações de outras camadas semi-permeáveis.

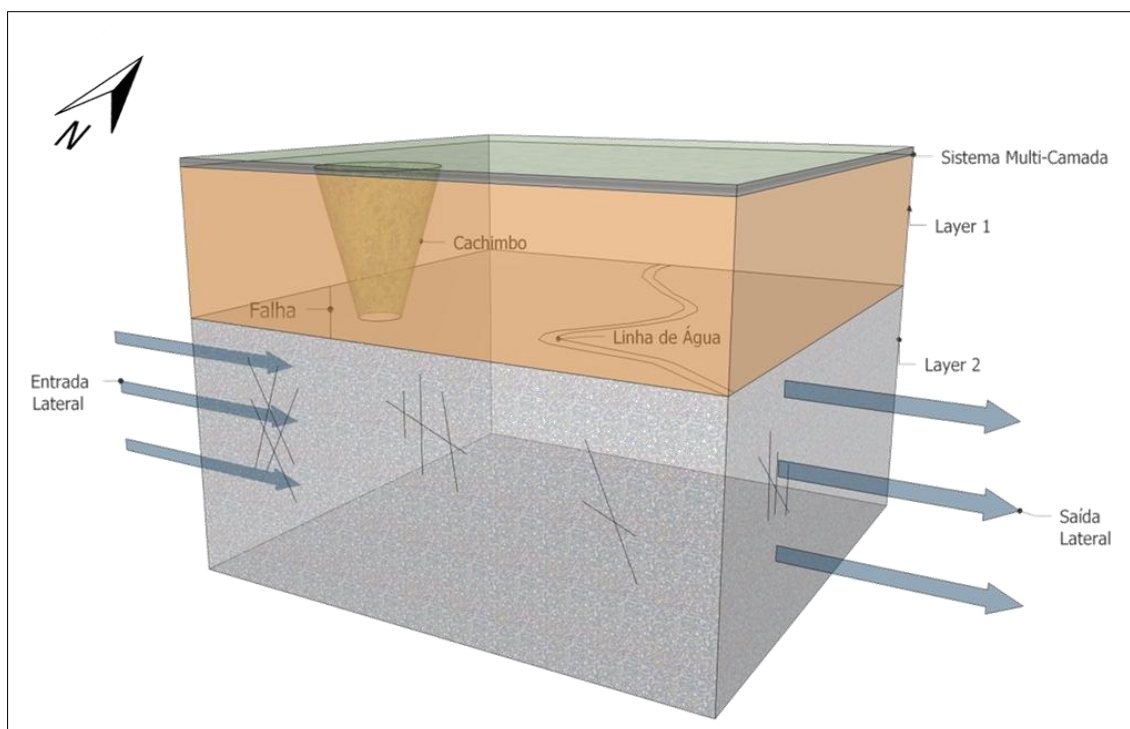
Foram criadas representações esquemáticas para duas situações distintas, uma representativa da do período ante-obra e outra relativa ao período pós-obra (Figura 4.2 e Figura 4.3).



**Figura 4.1. Modelo esquemático bidimensional no plano XY das entradas e saídas de água no sistema; a estes efeitos devem ser considerados os acréscimos devidos a fenômenos de recarga por infiltração na fase ante-obra**



**Figura 4.2 Esquematização do modelo conceitual quase-tridimensional situação Ante-Obra**



**Figura 4.3** Esquemática do modelo conceitual quase-tridimensional situação Pós-Obra

#### 4.4.2 Construção do modelo numérico interpretativo de referência

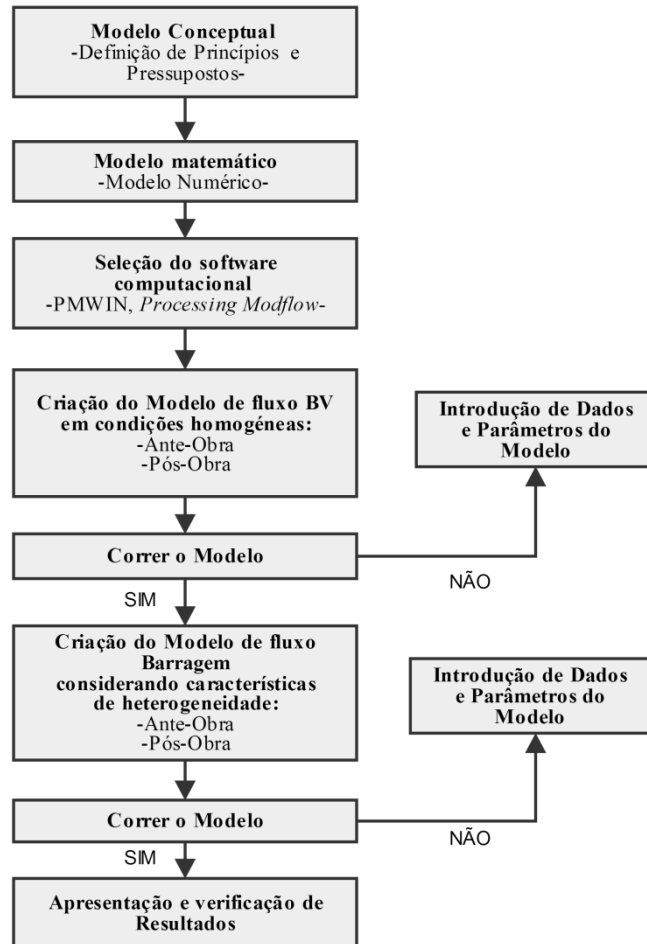
O desenvolvimento do modelo de escoamento da barragem foi feito através de um modelo matemático numérico, no qual as equações diferenciais do fluxo subterrâneo são resolvidas a partir de técnicas de aproximação numéricas, conseguidas por discretizações do aquífero e da solução de um sistema de equações.

A criação deste modelo numérico foi realizada através de um programa de domínio público. Foi utilizado o *software PMWIN, Processing Modflow versão 5.3.3*, que contém um algoritmo para resolver numericamente o modelo matemático. Este programa é baseado no código MODFLOW, desenvolvido pela US Geological Survey (McDonald & Harbaugh, 1988), as equações são resolvidas pelo método de diferenças finitas.

A execução do modelo foi conseguida através da introdução de um conjunto de dados físicos e hidrogeológicos da área da barragem no programa. Esta etapa exige grande sensibilidade na definição dos parâmetros inseridos e, portanto, a estimativa de parâmetros é uma tarefa vital na qualidade da modelação de águas subterrâneas. Os dados implementados no modelo incluem o dimensionamento da malha, a geometria do aquífero definida pela topografia, as condições limite e a seleção preliminar de valores para os parâmetros do aquífero.

Deste modelo resultou um modelo do tipo equivalente, genericamente mais homogêneo, que, posteriormente, serviu de base ao desenvolvimento de outros modelos, expressando a heterogeneidade característica do meio em análise, e permitiu estabelecer uma situação de comparação entre os cenários ante e pós obra.

O fluxograma seguinte demonstra quais as etapas desenvolvidas até à apresentação final dos modelos hidrogeológicos da barragem.



**Figura 4.4. Etapas da modelação na área de estudo (adaptado Anderson & Woessner, 1992)**

Para a construção do modelo numérico de base foram inseridos os seguintes dados:

- A. Dimensionamento da malha da área em estudo
- B. Estabelecimento da geometria do modelo
- C. Definição das condições fronteira
- D. Definição da carga hidráulica
- E. Introdução dos parâmetros do aquífero

### A. Dimensionamento da malha da área em estudo

A área modelada tem uma forma retangular e uma extensão de 630x943 metros, perfazendo uma área de 59ha. A discretização foi feita com células unitárias quadriculares, de dimensão 15x15 metros. Desta forma, a área do modelo foi dividida em 2860 células, com 65 linhas e 44 colunas.

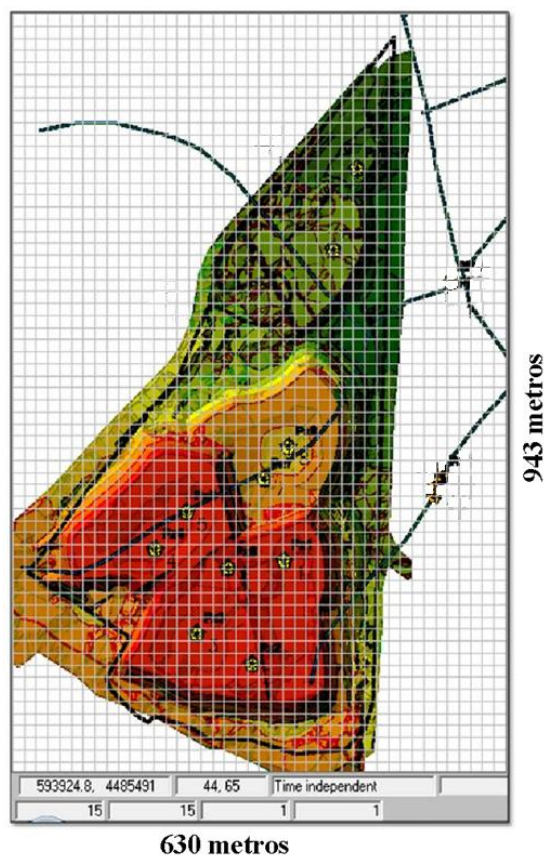


Figura 4.5. Dimensão da malha do modelo com MDT da situação ante-obra

### B. Estabelecimento da geometria do modelo e funcionamento vertical das camadas

Em termos de caracterização vertical, o modelo foi definido por duas camadas, uma representativa pelos depósitos de estêreis constituídos como aterro da barragem, e outra subjacentemente caracterizada pelo maciço granítico.

As dimensões da espessura de cada camada foram definidas com base na informação disponível relativas à topografia específica de cada camada.

O topo do layer 1, foi definido através do modelo digital do terreno criado pelo *software* ArcGIS, que contém na sua essência a informação da altimetria (Figura 4.6).

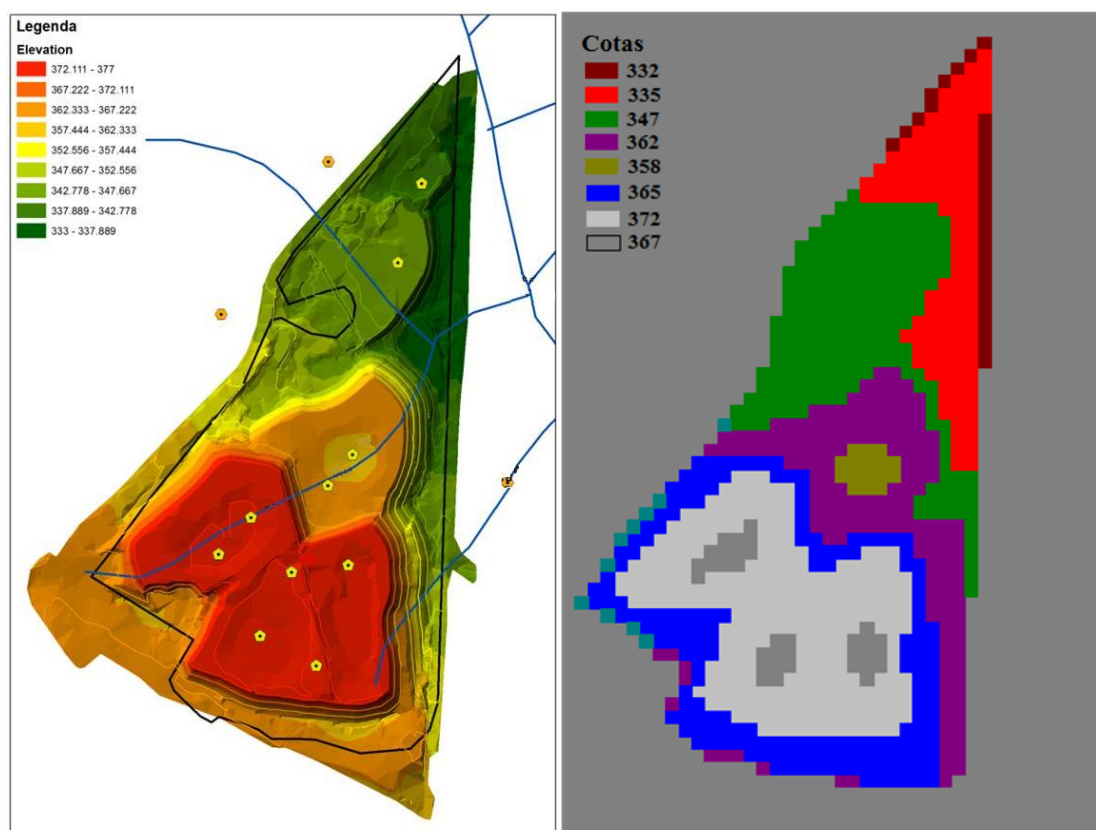
O topo do maciço granítico, layer 2, foi conceptualizado com base na informação topográfica de 1942 (Carta Militar de Portugal). Através da informação da carta, foi possível definir a morfologia de superfície do maciço rochoso, visto tratar-se de uma situação preexistente ao enchimento de rejeitados mineiros na barragem. Verificou-se que o substrato da escombreira apresenta uma morfologia cônica com eixo orientado segundo a direção da linha de água (NE-SW) (Figura 4.8). A diferença entre o topo das duas camadas permitiu definir a geometria do modelo.

O exercício anterior foi aplicado para os dois períodos distintos, a diferença na geometria das camadas para situação pós-obra foi o topo da primeira camada, que apresenta níveis topográficos distintos após a modelação superficial da barragem em detrimento das obras de requalificação. Desta forma, para o período II, o topo do layer 1 foi definido com base no modelo digital do terreno da barragem após as obras (Figura 4.7).

Com base na informação local estudada anteriormente, a camada 1 foi definida de tipo 1: não confinada. Esta opção é válida apenas para a primeira camada, isto porque o limite superior é a superfície de saturação permeável na qual todos os pontos se encontram à pressão atmosférica. Assim a recarga é executada diretamente no próprio local, em toda a extensão da formação.

A camada 2 é do tipo 2: confinada/não confinada com transmissividade constante. Uma camada deste tipo é parcialmente conversível entre confinado e não confinado e a transmissividade de cada célula é constante em toda a simulação

Desta forma, a camada 1 apresenta uma espessura variável, de 2 a 25 metros aproximadamente e a camada 2 de 30 a 60 metros. Após a modelação do terreno, a camada 1 passou a apresentar uma espessura de 36 a 1 metro.



**Figura 4.6 Morfologia da barragem na situação Ante-Obra. Esq.: MDT da barragem. Dir.: Topografia topo L1 (PMWIN)**



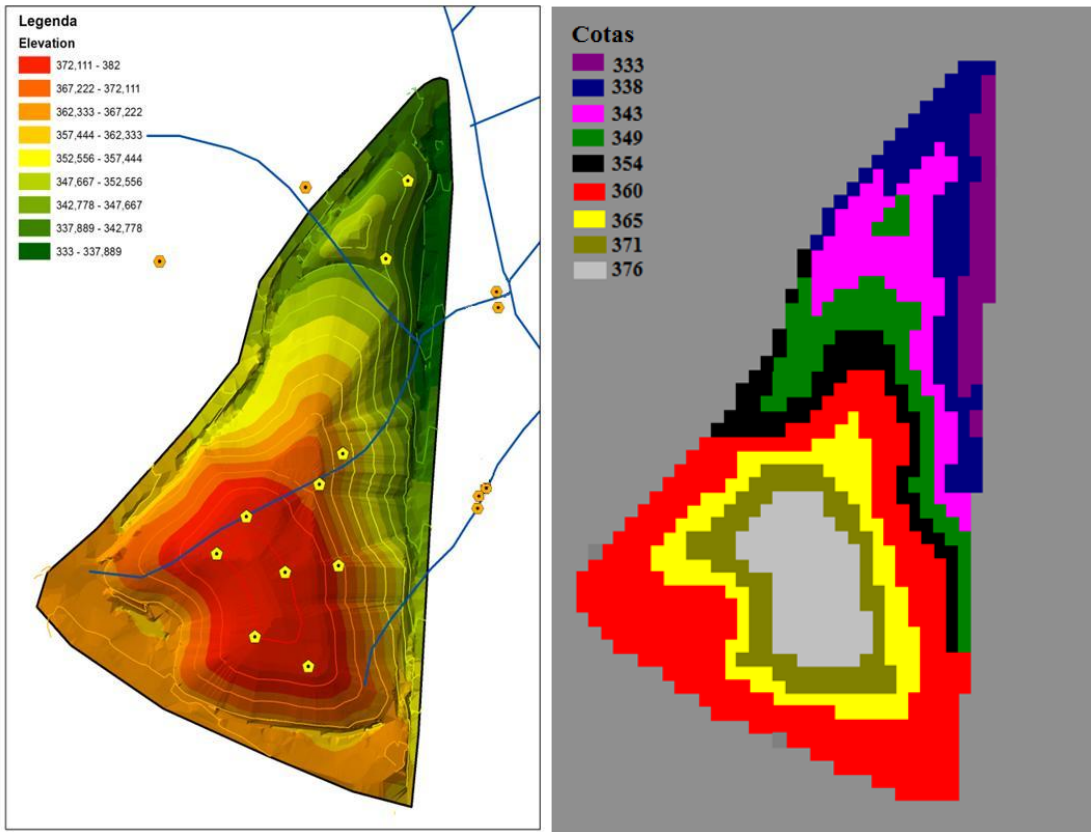


Figura 4.7 Morfologia da barragem na situação Pós-Obra. Esq.: MDT da barragem. Dir.: Topografia topo L1 (PMWIN)

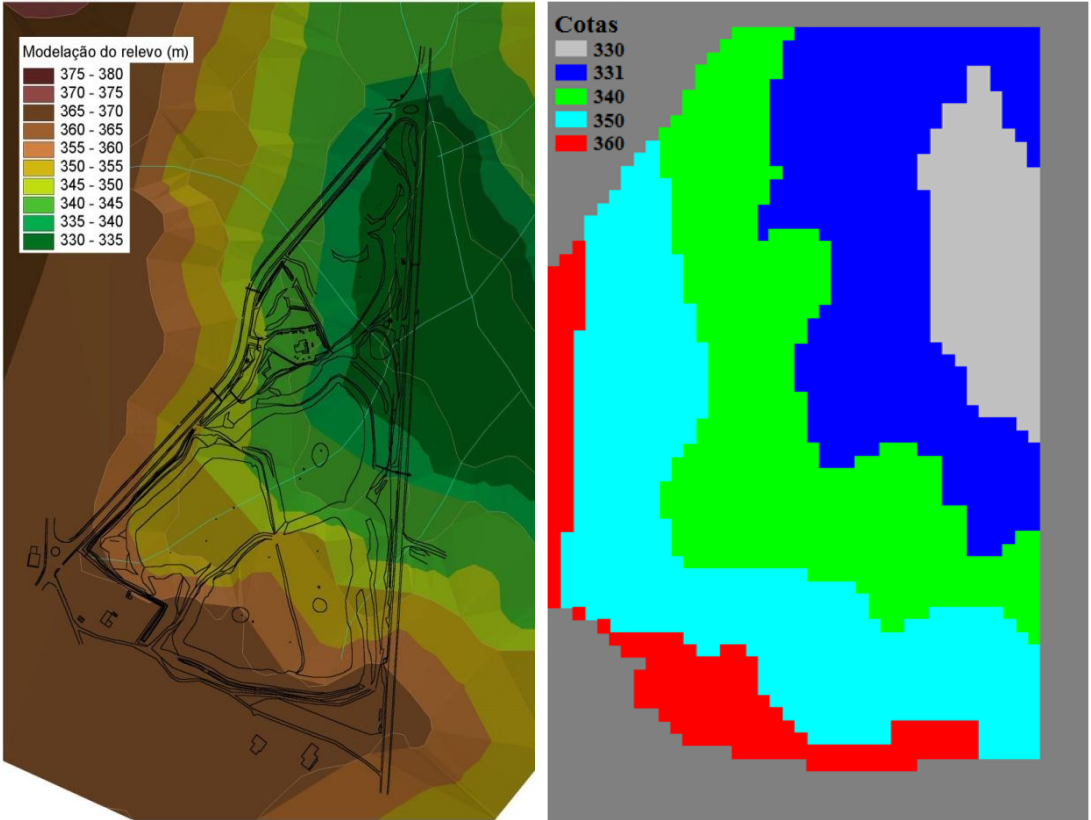


Figura 4.8. Esq.: Topografia Ante-Exploração 1942. Dir.: Topografia topo L2 (PMWIN)

Tabela 4.4. Síntese da Geometria do Modelo

	Layers	Material	Funcionamento Camada	Definição Topografia (Topo)
<b>Ante Obra</b>	L1	Depósitos de Estéreis	Tipo 1: Não Confinada	MDT da barragem no período I a partir <i>software</i> ArcGIS
	L2	Maciço Granítico	Tipo 2: Confinada/Não confinada com transmissividade constante	Carta topográfica de 1942
<b>Pós Obra</b>	L1	Depósitos de Estéreis	Tipo 1: Não Confinada	MDT da barragem no período II a partir <i>software</i> ArcGIS
	L2	Maciço Granítico	Tipo 2: Confinada/Não confinada com transmissividade constante	Carta topográfica de 1942

### C. Definição das condições fronteira

Os limites utilizados foram de três tipos: limites de fluxo nulo, limites de fluxo a cota constante (tipo “*head constant*”) e limites de fluxo positivos.

Os limites de fluxo nulos foram aplicados nas duas camadas do modelo na área exterior à barragem, visto que a zona de interesse corresponde apenas aos acontecimentos no interior da barragem. Assim, foi atribuído o valor de 0, tornando as células inativas em torno da zona de estudo situada em redor da área da barragem e sua envolvente imediata.

As zonas dos “cachimbos” foram modeladas como drenos completamente abertos, considerando-se as células como limites do tipo “*head constant*” (valor -1) apenas para a camada 1. Nestes locais foram atribuídos os valores de condutividade hidráulica e de porosidade máximas, de 1, uma vez que se tratam de poços que se encontram vazios (funcionamento tipo “conduta vertical”). A dimensão destes corpos foi estabelecida de forma a induzir uma influência segundo um raio de ação expresso pelas células definidas como “*head constant*”.

Para a camada 2, foram selecionadas células de fluxo constante, nos limites Este e Oeste da Barragem, por se tratar de zonas preferenciais de entrada e saídas de água.

As áreas de circulação preferencial de águas, coincidentes com a localização das antigas linhas de água, locais com funcionamento dado por maior densidade de fracturação foram igualmente modeladas como drenos, considerando-se neste caso condutividades hidráulicas superiormente contrastantes para com as do maciço granítico envolvente.

As demais células do modelo funcionam como células ativas, tendo-lhes sido atribuído o valor de 1.

É de notar que perante a pouca quantidade de dados foi necessário atribuir esta configuração às condições fronteira, de modo a que as piezometrias forneçam uma resposta condicionada aos valores presentes nas matrizes carregadas no modelo numérico tendo-se constatado por experimentação ser esta a opção que permitiu obter os modelos mais fidedignos para a área em estudo.

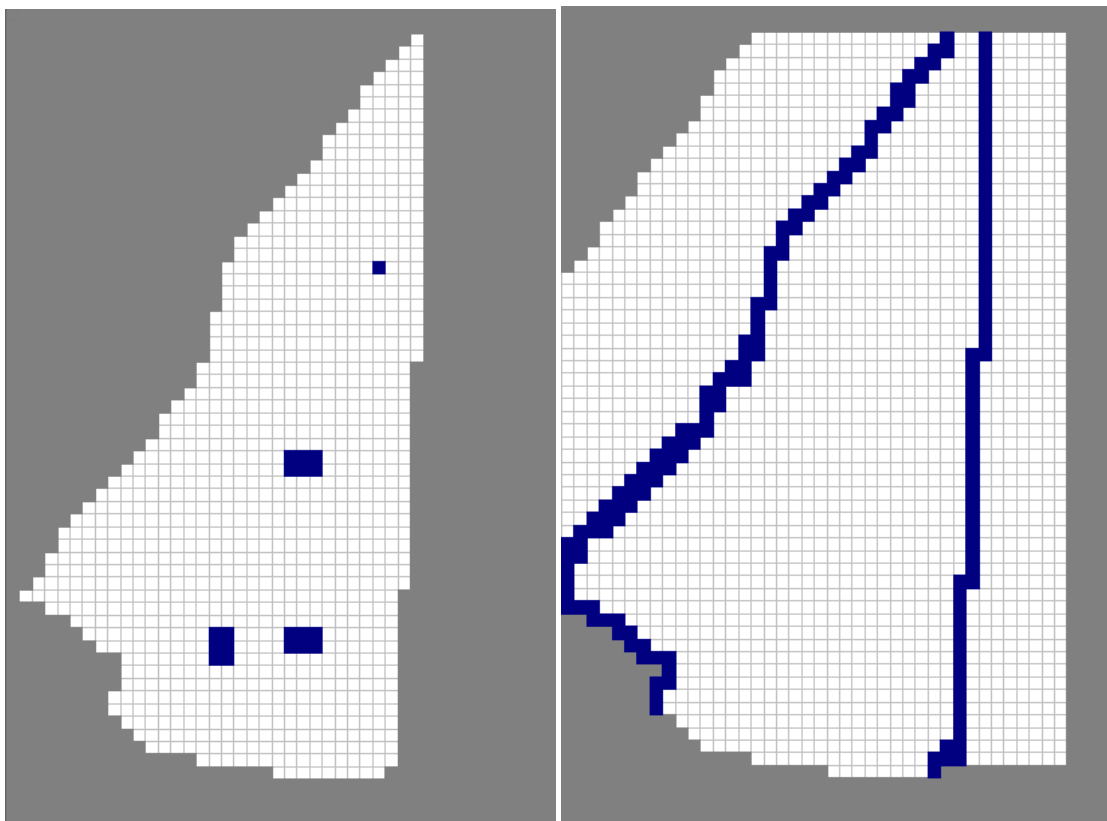


Figura 4.9. Condições fronteira. Esq.: Camada 1; Dir.: Camada 2

Tabela 4.5. Síntese das Condições Fronteira definidas no Modelo

	Layers	Zonas	Condição Fronteira
Ante e Pós Obra	L1	Exterior Barragem	0: Células Inativas
		Interior Barragem	1: Células Ativas
		Cachimbos	-1: Células Fluxo a Cota Constante
	L2	Exterior Barragem	0: Células Inativas e Ativas
		Interior Barragem e as suas zonas limítrofes	1: Células Ativas
		Limites W e E Barragem	-1: Células Fluxo a Cota Constante

#### D. Definição da carga hidráulica

Foram atribuídos valores de carga hidráulica distintos para cada camada e para os dois períodos. Esta informação foi considerada com base no estudo dos níveis piezométricos da barragem anteriormente analisados (4.3) bem como na informação hidrogeológica da área.

Neste sentido para a situação ante obra, a carga hidráulica atribuída ao modelo na camada 1 foi utilizado o módulo “*field interpolation*” do PMWIN que permitiu a definição de valores de carga hidráulica em toda a matriz do modelo. Este módulo corre independentemente do PMWIN.

É um processo expedito que funciona como intermediário e que permitiu estimar valores e preencher dados em locais sem dados atribuídos a partir de um conjunto discreto de dados conhecidos.



Para aplicação deste módulo é necessário importar um ficheiro de dados que contenha informação do número de amostras, as suas localizações espaciais (X e Y) e o valor de piezometria atribuído a essa localização da amostra. Para o presente caso foram considerados os valores médios dos níveis piezométricos dos respetivos 10 piezómetros instalados no corpo da barragem (para os dois períodos).

Assim, o ficheiro deve apresentar o seguinte formato, onde N é o número de amostras:

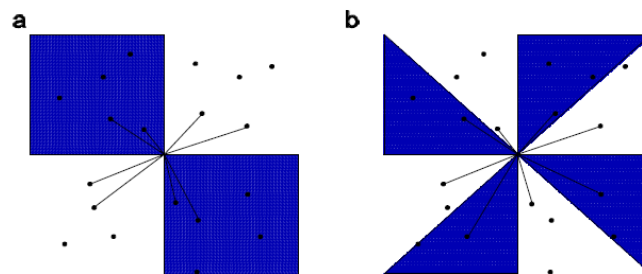
N (Primeira linha do Ficheiro)  
 $X_1, Y_1, Z_1$  (Segunda linha do ficheiro)  
 $X_i, Y_i, Z_i$  ((i+1)-th linha do ficheiro)  
 $X_N, Y_N, Z_N$  (última linha do ficheiro)

É ainda necessário configurar a posição da grelha bem como a seleção do método interpolador. Para o presente caso, foi selecionada a grelha já definida no modelo e o método interpolador escolhido foi o *kringing*.

Neste método o PMWIN assume que os dados de medição são estacionários e isotrópicos e estima o valor de uma célula do modelo a partir de um número de dados adjacentes, considerando a interdependência expressa no variograma. Foi considerado um modelo de variograma linear.

Por último foi definido o método de pesquisa das amostras. Os algoritmos de interpolação utilizam três métodos de busca para encontrar um determinado número de pontos de medição para interpolar um valor de uma célula. Os métodos de pesquisa podem ser simples, quadrante e octante.

Neste caso foi selecionado o método de procura de dados octante onde encontra os dados de pontos mais próximos de cada octante em torno de uma célula do modelo.



**Figura 4.10. a) Método de procura quadrangular b) Método de procura Octante.**  
 (Fonte: Chiang, 2003)

A segunda camada do modelo foi definida com base na morfologia do granito subjacente, ou seja, na topografia de 1942. Considerando-se que os níveis piezométricos acompanham a topografia pelo que se assumiram cotas piezométricas situadas entre 1 a 6 metros abaixo das cotas do terreno (Figura 4.11).

Para a situação pós obra, foram considerados os valores de carga hidráulica dos piezómetros de monitorização da barragem com a informação dos níveis para este período. Para as duas camadas, neste período, foi aplicado o método de interpolação por Krigagem.

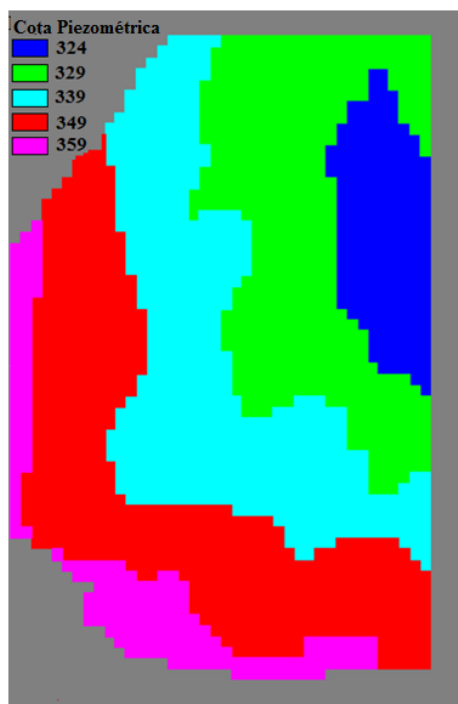


Figura 4.11 Carga hidráulica - situação ante-obra (L2)

Tabela 4.6. Síntese da definição da Carga Hidráulica no Modelo

	Layers	Definição Carga Hidráulica
Ante Obra	L1	Método interpolador <i>Kriging</i> a partir de dados de 10 pontos de monitorização no interior barragem
	L2	Com base na topografia de 1945 (Carta Militar)
Pós Obra	L1	Método interpolador <i>Kriging</i> a partir de dados de 11 pontos de monitorização no interior barragem de referência A
	L2	Método interpolador <i>Kriging</i> a partir de dados de 11 pontos de monitorização no interior barragem de referência B

#### E. Introdução dos parâmetros do aquífero

Os parâmetros hidrodinâmicos da barragem foram inseridos com base no conhecimento pericial da zona de estudo e no estudo de diferentes autores. Nesta etapa foram definidas as condutividades horizontais e verticais e a porosidade efetiva para a parametrização do modelo, através de valores tabelados conforme as características do material da área de estudo (**Anexos III e IV**).

Em termos de condutividade hidráulica foram atribuídos diferentes valores às células consoante a sua posição na área de estudo.

Aos locais onde se encontram os “cachimbos” e a linha de água subjacente, foram atribuídos valores de condutividade distintos por serem locais preferenciais de escoamento de água, para que funcionassem como drenos.

A porosidade efetiva dos cachimbos é de 100%, permitindo a água escoar na totalidade sendo a condutividade vertical e horizontal máximas.

No caso das linhas águas, igualmente modeladas como drenos, atribuíram-se valores de condutividade hidráulica mais elevados que os das restantes células.

É de referir que os parâmetros de permeabilidade e porosidade para material sólido e não fraturado de natureza ígnea são expressos por condutividades hidráulicas muito baixas ou nulas.

Contudo, o nível de alteração e fracturação induzem uma porosidade secundária responsáveis pelo escoamento da água subterrânea no material e assim levam ao aumento das condutividades hidráulicas. Este episódio acontece no presente caso, visto o maciço granítico apresentar níveis de alteração elevados.

Em relação à recarga do sistema o valor introduzido corresponde a  $1.23 \times 10^{-8}$  m/s. Este valor foi atribuído em função dos resultados de excedente anual da região nos últimos 30 anos calculado anteriormente (4.2). Este método de estimação indireto de entradas de água utiliza variáveis que descrevem e representam o fluxo de água através do solo.

Para o período II, a parametrização do modelo foi idêntica ao do período I. Contudo neste caso, visto a barragem ter sido impermeabilizada, o valor de recarga para teste período é nulo, uma vez que as entradas de águas pluviais serem dificultadas pela multi-camada instalada.

**Tabela 4.7. Síntese Parâmetros Introduzidos no Modelo**

	Layers	Zonas	$K_H$ (m/s)	$K_V$ (m/s)	Porosidade efetiva	Recarga (m/s)
<b>Ante Obra</b>	<b>L1</b>	Cachimbos	1	1	1	$1.23 \times 10^{-8}$
		Restantes células	$1 \times 10^{-5}$	$1 \times 10^{-6}$	0.18	
	<b>L2</b>	Linha de Água	0.1	0.01	0.8	
		Restantes Células	$1 \times 10^{-4}$	$1 \times 10^{-7}$	0.2	
<b>Pós Obra</b>	<b>L1</b>	Todas as células do modelo	$1 \times 10^{-5}$	$1 \times 10^{-6}$	0,18	0
		Linha de Água	0.1	0.01	0.8	
	<b>L2</b>	Restantes Células	$1 \times 10^{-4}$	$1 \times 10^{-7}$	0.2	

#### 4.4.2.1 Resultados do modelo numérico de base

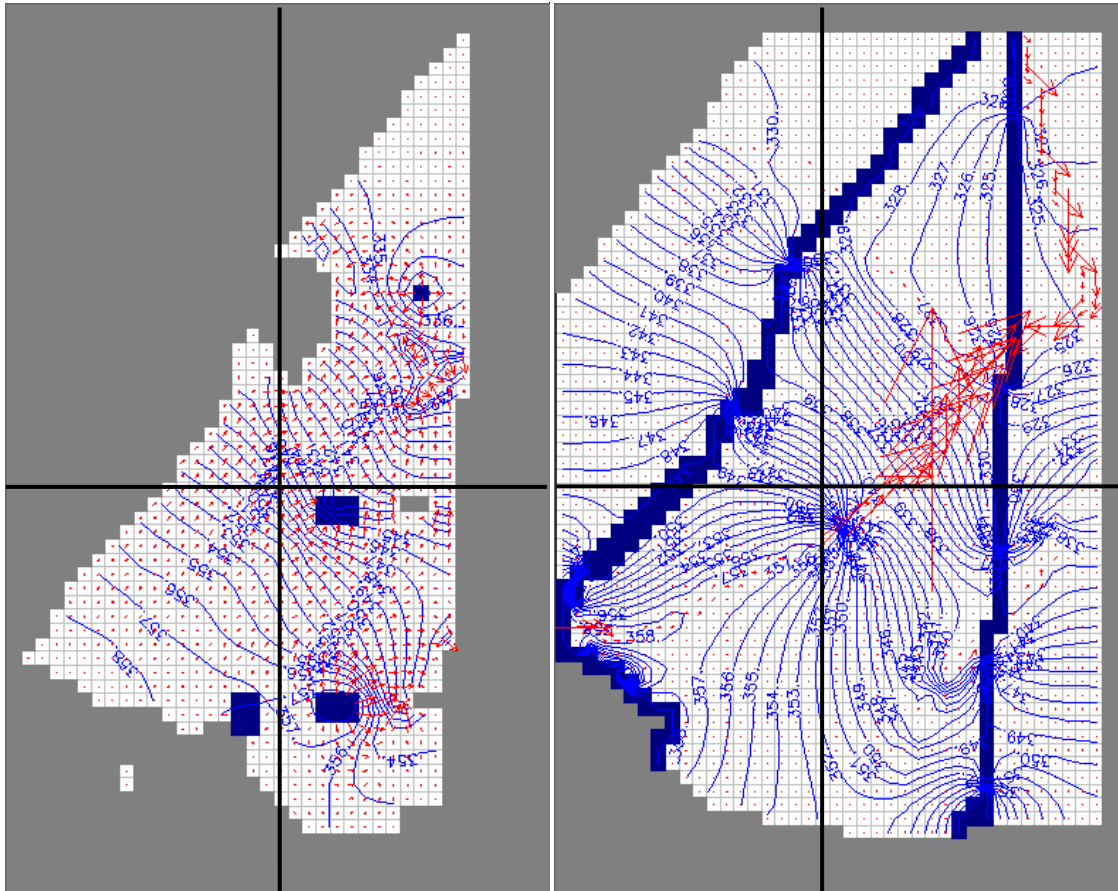


Figura 4.12 Resultados do modelo fluxo de referência no período I - Ante Obra e respectiva localização dos perfis. Esq: L1; Dir: L2

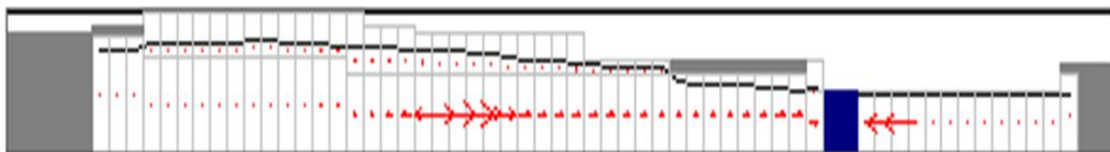


Figura 4.13. Perfil na direção S-N do modelo fluxo de referência no período I – Ante Obra

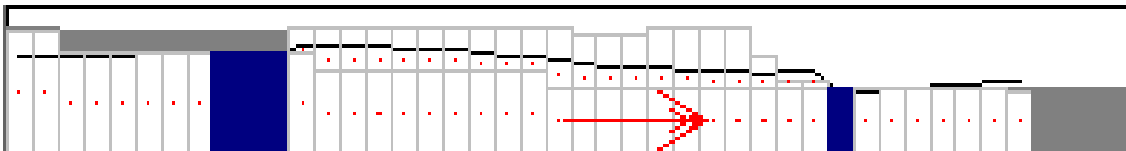
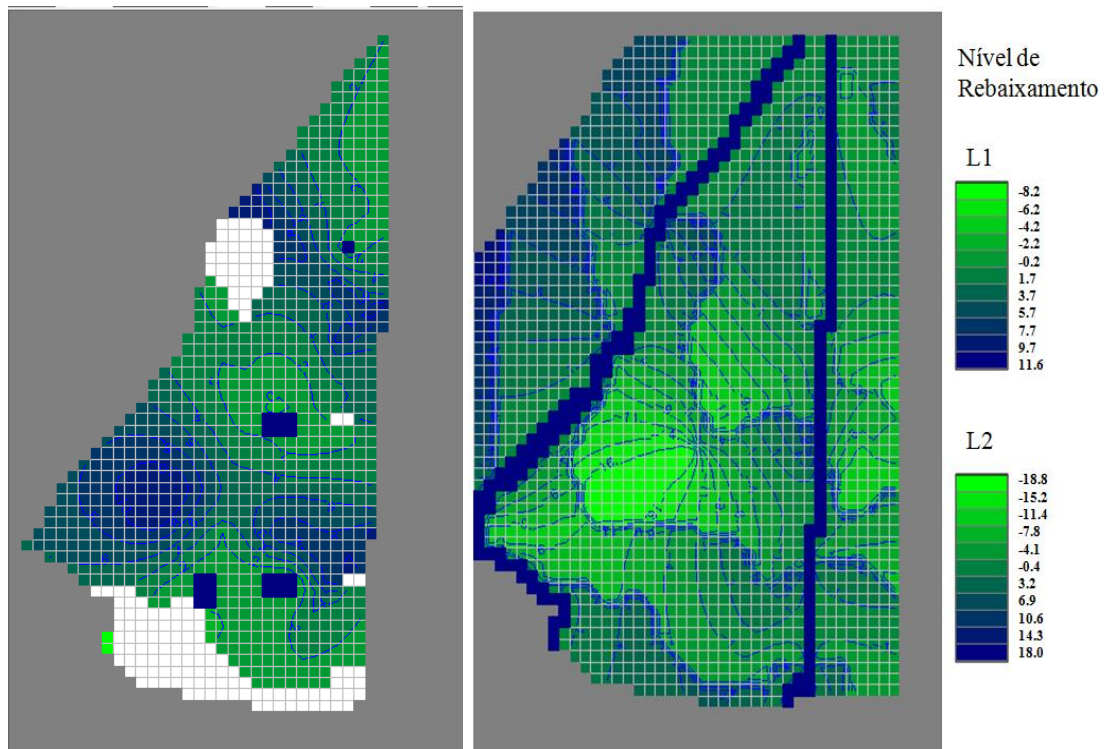


Figura 4.14. Perfil na direção W-E do modelo fluxo de referência no período I – Ante Obra



**Figura 4.15. Nível de Rebaixamento no período I - Ante Obra Esq.: L1 Dir.: L2**

Pelos resultados, no layer 1 os níveis piezométricos são inferiores nos locais de topografia menos acentuada, neste caso a NE da barragem.

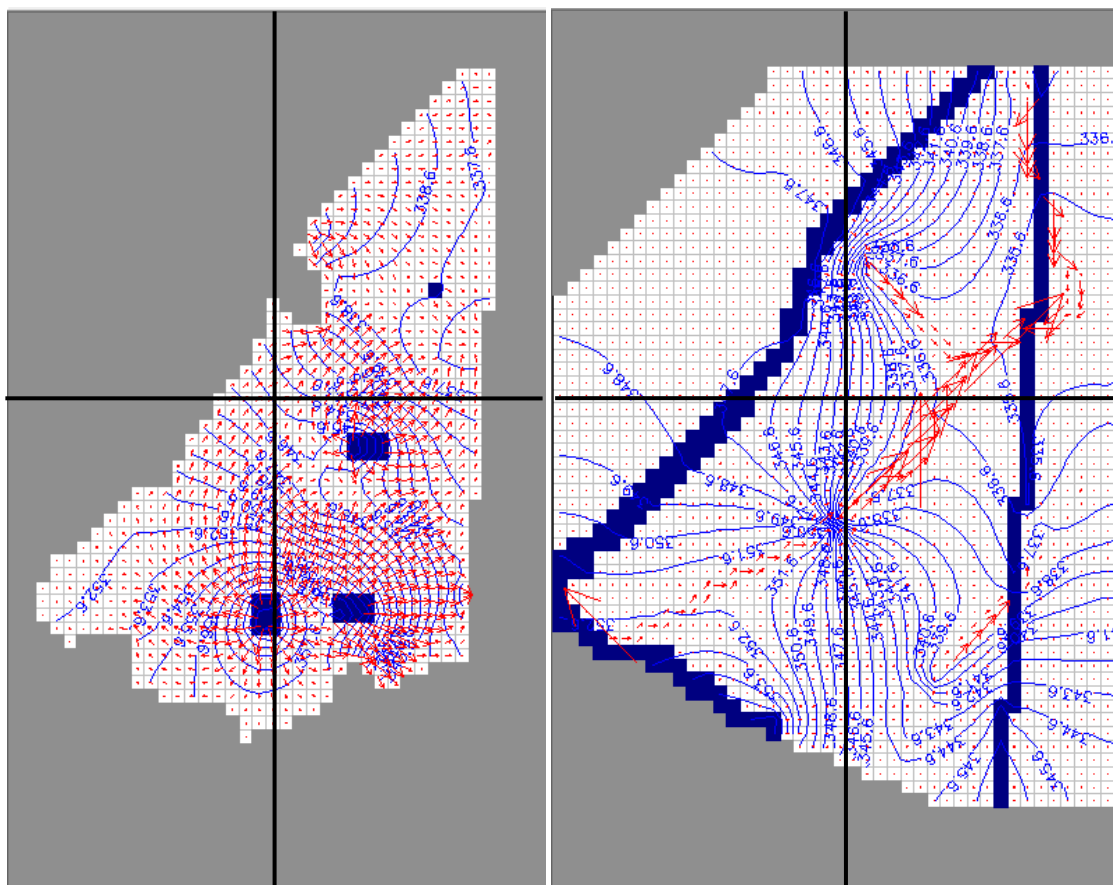
Verifica-se a existência de um rebaixamento nas cotas piezométricas em torno das zonas onde se encontram localizados os cachimbos, sendo este mais pronunciado no cachimbo que se encontra a NE da barragem e observa-se que os vetores de fluxo se dirigem para este local. A existência de resultados de rebaixamento em regime estacionário evidencia, assim, a função drenante atribuída aos cachimbos que resultam da criação de gradientes hidráulicos gerados pela em circulação preferencial do fluxo através destas estruturas.

Os vetores de fluxo dirigem-se principalmente para o limite Este da barragem, mais precisamente na zona mais a NE da barragem. Desta forma, o escoamento no L1 dá-se de SW para NE.

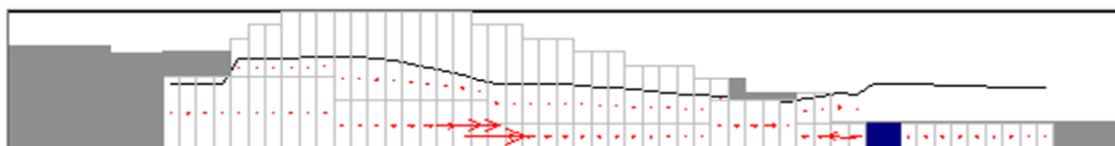
Relativamente ao layer 2, o fluxo de escoamento dá-se de SW para NE verificando-se uma diminuição dos níveis freáticos neste sentido. Neste cenário, o comportamento das linhas potenciométricas demonstram rebaixamento no sentido da linha de água. Este fato é validado pelo sentido dos vetores de fluxo na localização das linhas de água.

Os resultados dos perfis da barragem (Figuras 4.13 e 4.14) demonstram um gradiente hidráulico superior no layer 2. O nível piezométrico indica uma diminuição no sentido do escoamento, ou seja, de SW para NE.

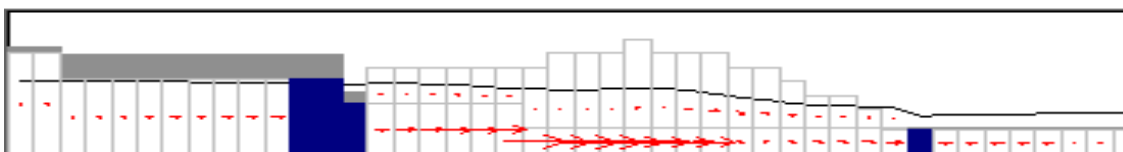
Os níveis de rebaixamento demonstram a diferença entre as piezometrias de partida e o nível piezométrico calculado. Quanto aos resultados de rebaixamento são mais pronunciados no L2, com níveis a variar de -18.8 até aos 18 metros. Neste nível apresentam grande variabilidade demonstrando um déficit nas zonas onde se encontram instalados os piezômetros 4 e 5 da barragem. Em contrapartida no L1, os níveis mais baixos encontram-se nas zonas dos cachimbos e níveis mais altos nas transições das zonas dos cachimbos.



**Figura 4.16. Resultados do modelo fluxo de referência no período II - Pós Obra e respectiva localização dos perfis. Esq.: L1; Dir.: L2**



**Figura 4.17. Perfil na direção S-N do modelo fluxo de referência no período II – Pós Obra**



**Figura 4.18. Perfil na direção W-E do modelo fluxo de referência no período II – Pós Obra**



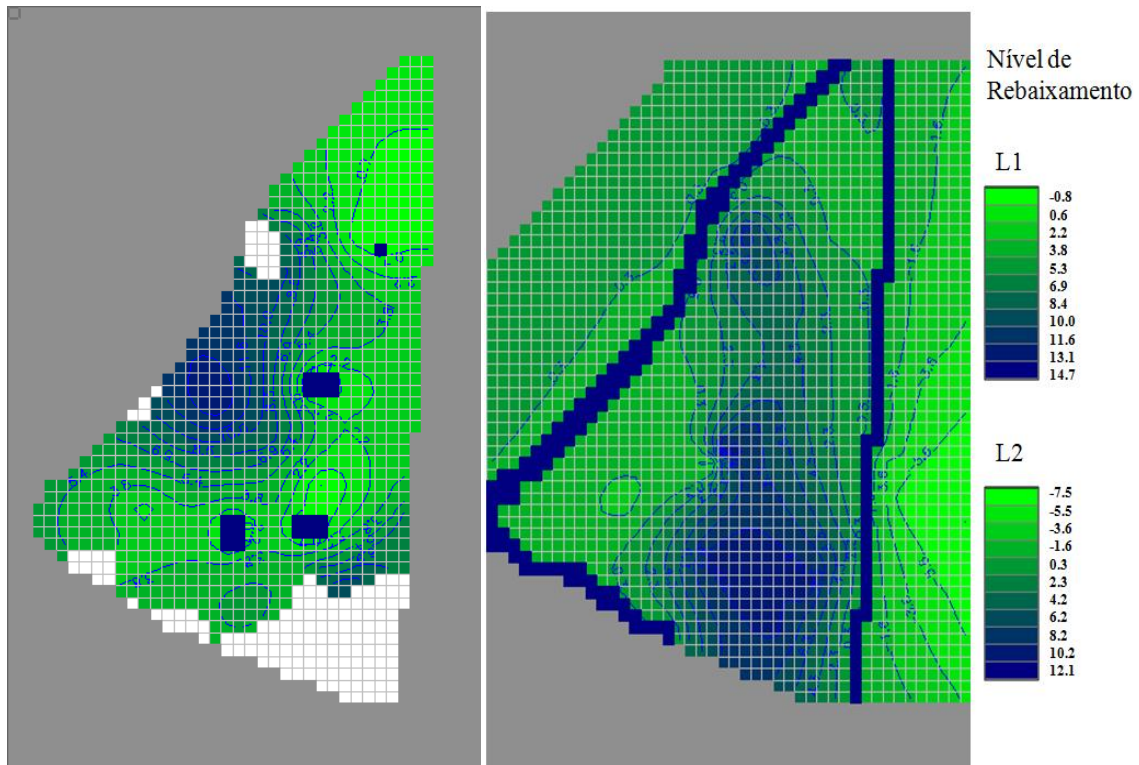


Figura 4.19. Nível de Rebaixamento no período II - Pós Obra Esq.: L1 Dir.: L2

Na situação pós-obra, verifica-se uma diferença relativamente ao caso à situação ante-obra.

Para a primeira camada, constituída por material rejeitado, observa-se uma diminuição do nível freático, embora as linhas potenciométricas demonstrem um comportamento mais irregular em torno dos cachimbos que se encontram a sul barragem (Figura 4.16).

Quanto aos vetores de fluxo, estes por sua vez, demonstram o mesmo sentido de escoamento que na situação ante-obra, embora na zona dos cachimbos denote-se uma orientação dos vetores no sentido exterior aos cachimbos em todas as direções.

Relativamente à segunda camada, o fluxo é idêntico ao anterior, com a diferença dos vetores de fluxo demonstrarem menor intensidade e até seguindo um percurso para o exterior da barragem.

Os perfis demonstram uma diminuição do nível piezométrico de Sul para Norte e de W para E.

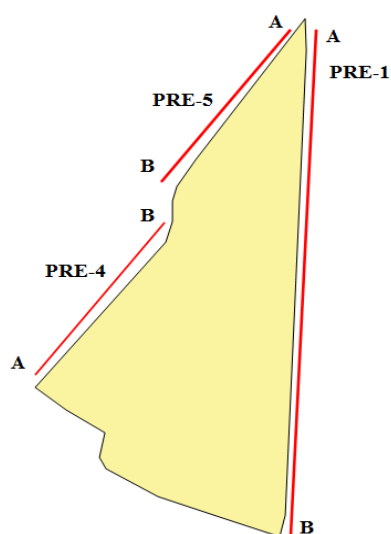
Os gradientes hidráulicos são igualmente maiores no L2 do que no L1, conforme pode ser visível constatado pela dimensão dos vetores de fluxo (setas vermelhas).

Quanto aos níveis de rebaixamento, para a primeira camada, estes apresentam uma gama de valores mais elevados do que acontece na situação ante obra, atingindo-se níveis de rebaixamento de 14.7 metros. Na segunda camada, o rebaixamento é mais acentuado no interior da barragem, diminuindo para o seu exterior

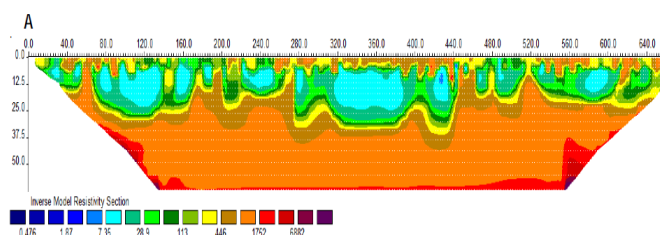
### 4.4.3 Modelo numérico interpretativo considerando efeitos de heterogeneidade

Através dos modelos numéricos de escoamento de base, foram construídos modelos para os dois períodos considerando as heterogeneidades presentes no maciço rochoso. Para isso, recorreu-se aos perfis geofísicos de resistividade elétrica realizados nos limites da barragem.

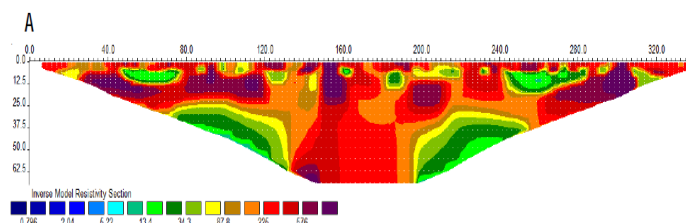
Através da informação geofísica foi possível identificar zonas onde o maciço granítico apresentava menor ou maior resistência e assim permitiu reconhecer diferentes níveis de alteração e resistência do maciço.



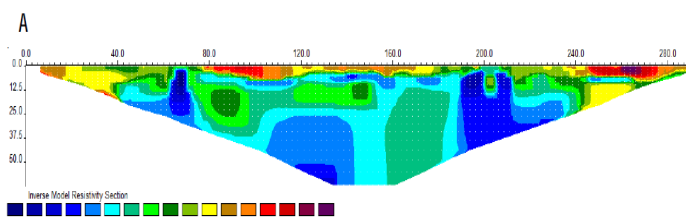
**Figura. 4.20.** Localização dos perfis realizados na barragem (Fonte: Relatório técnico de prospeção geofísica, *vide* Anexo Confidencial 4)



**Figura. 4.21.** Perfil (PRE-1) de resistividade elétrica limite Este barragem



**Figura.4.22.** Perfil (PRE-4) de resistividade elétrica limite SW barragem



**Figura. 4.23.** Perfil (PRE-5) de resistividade elétrica limite NW barragem

Pelo perfil PR-1 (Figura. 4.21) identifica-se uma distinção do maciço em profundidade. Onde a zona mais superficial (aproximadamente até aos 25 metros), apresenta resistividades mais baixas. Na extremidade B do perfil, a SE da barragem, as resistividades demonstram ser mais elevadas devido a se encontrar no topo do talude rochoso.

As baixas resistividades encontram-se em zonas de topografia mais baixas, que contribui para uma maior acumulação de águas de percolação.

Em profundidade as resistividades são bastante elevadas correspondendo provavelmente a granitos pouco alterados e pouco fraturados, logo secos.

Assim foram atribuídos diferentes valores de condutividade nas imediações a Este da barragem para o maciço granítico. Mais a norte um valor de condutividade mais elevada (0,001 m/s), passando a condutividades relativamente mais baixas para sul (0,0001 e 0,00001 m/s). De



referir que os valores adotados e as suas diferenças de magnitude foram experimentalmente ensaiadas.

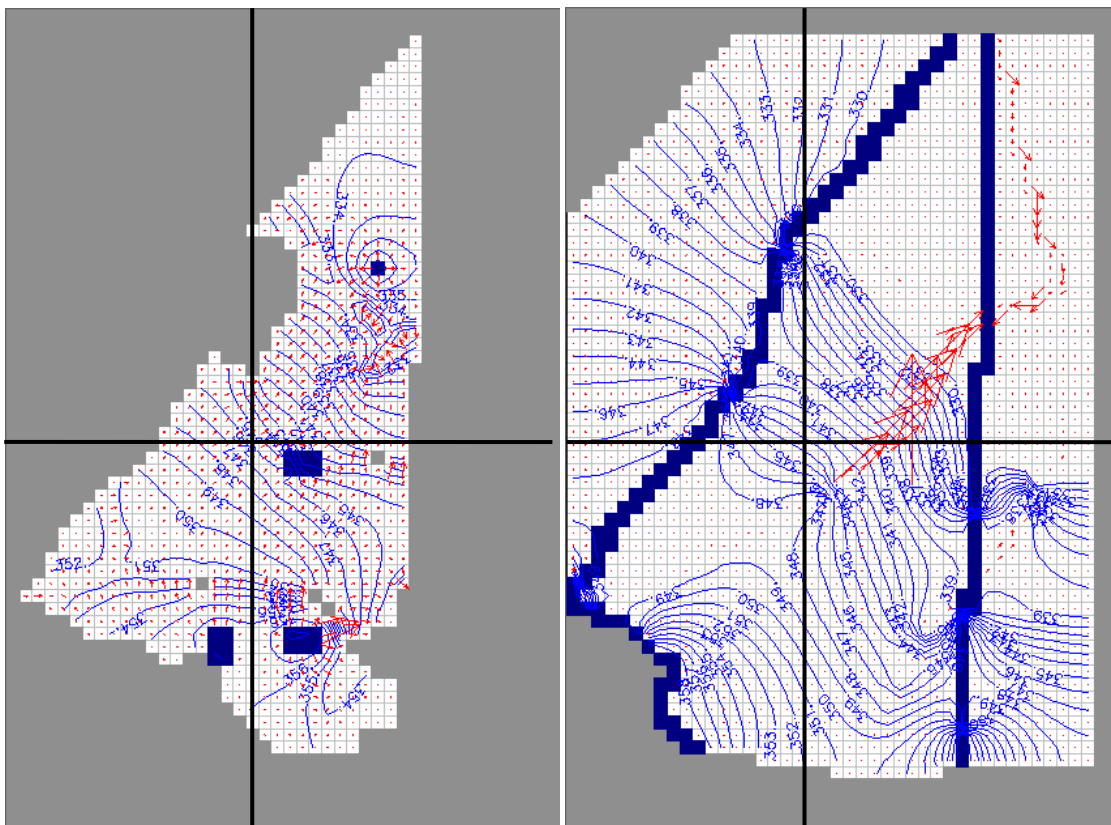
Pelo perfil PRE-4 (Figura.4.22), verificam-se várias anomalias à superfície o que indica a percolação de águas nestes locais.

Em profundidade as anomalias de resistividade indicam zonas fraturadas e muito alteradas essencialmente argilosas, ou seja, o maciço granítico neste local encontra-se relativamente alterado e fraturado.

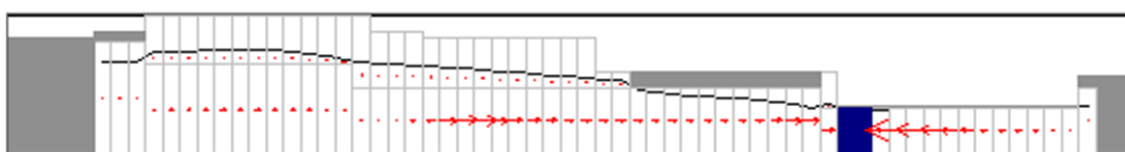
Através do perfil PRE-5 (Figura. 4.23), verifica-se resistividades elevadas próximo da superfície, contudo em profundidade exhibe resultados de resistividade baixa, indicando um maciço bastante alterado e com ocorrências de exsurgências de água.

Na extremidade W da barragem foi atribuído um valor de condutividade de 0,001 m/s, visto os perfis nesta zona indicarem resistividades baixas.

Desta forma, é de referir que as condutividades atribuídas, considerando as condições de heterogeneidade do meio foram introduzidas de forma comparativa com base nos locais de maior e menor resistência do material.



**Figura. 4.24. Resultados do modelo de fluxo com características heterogêneas no período I – Ante-Obra e respetiva localização dos perfis. Esq.: L1; Dir.: L2**



**Figura. 4.25. Perfil na direção S-N do modelo fluxo heterogêneo no período I – Ante-Obra**

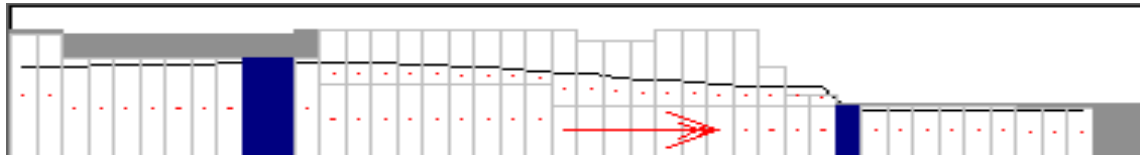


Figura. 4.26. Perfil na direção W-E do modelo fluxo heterogêneo no período I – Ante-Obra

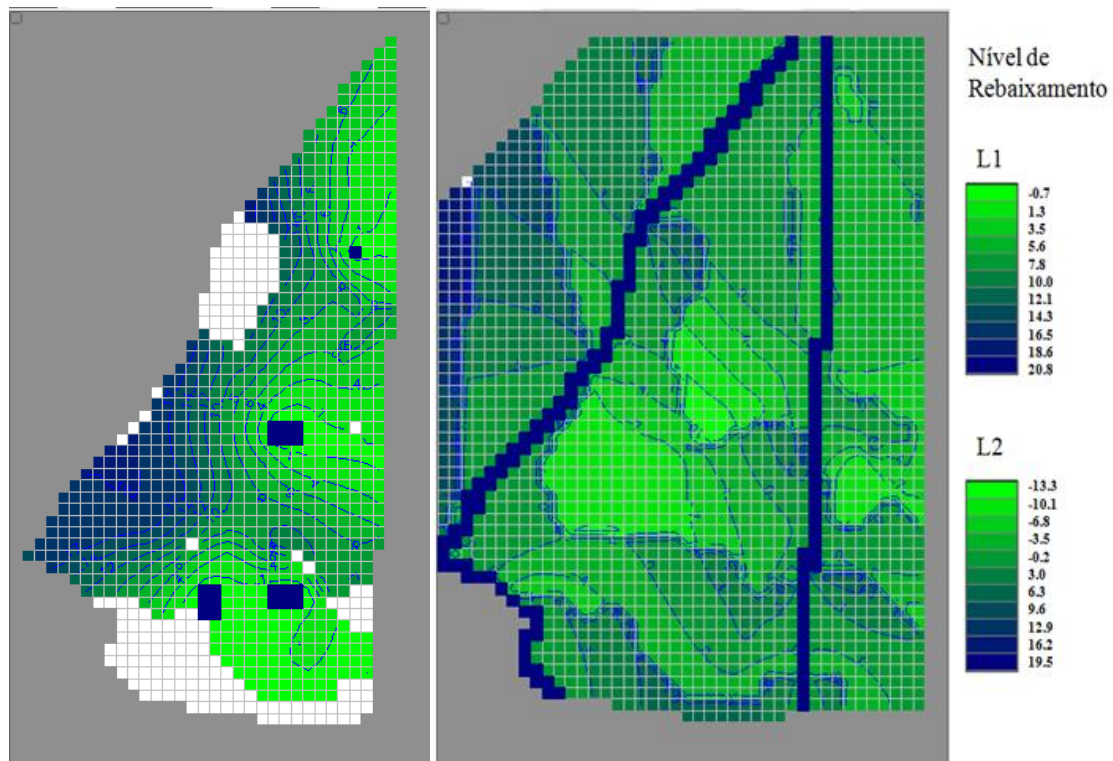
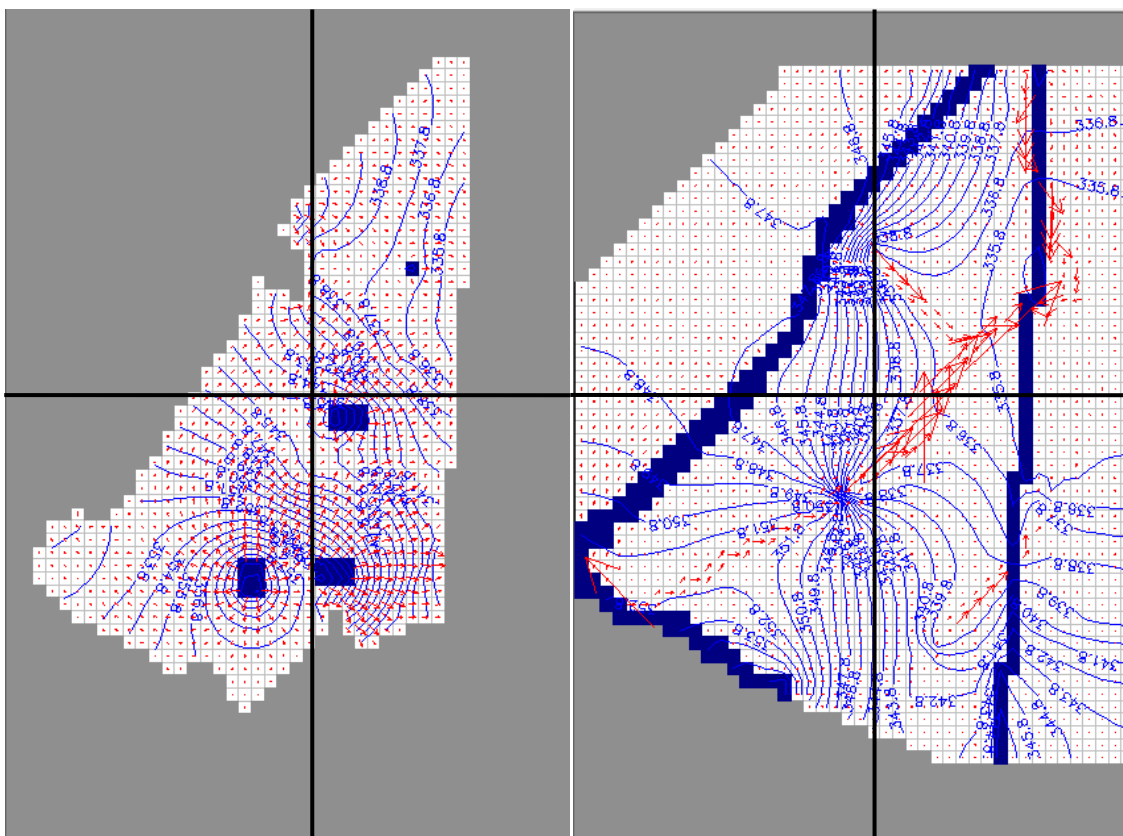


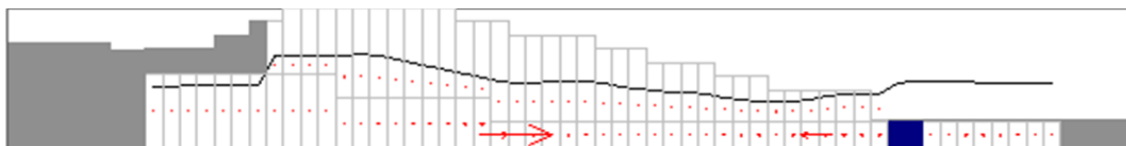
Figura.4.27. Nível de Rebaixamento no período I - Ante Obra Esq.: L1 Dir.: L2

Para a situação ante-obra e considerando as heterogeneidades do maciço, os resultados não foram distintos dos modelos de fluxo interpretativo homogêneo. Na camada 1, o fluxo de escoamento é influenciado pela presença dos cachimbos, e o L2, pela linha de água sub-superficial. O escoamento dá-se igualmente de SW para NE e o gradiente hidráulico é superior no L2.

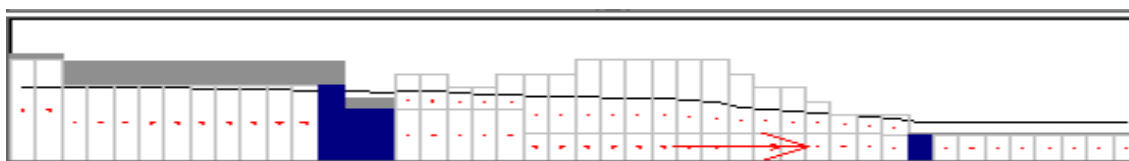
Relativamente aos rebaixamentos, tanto no L1 como no L2 são mais expressivos neste caso, chegando aos 20 metros em algumas zonas da barragem.



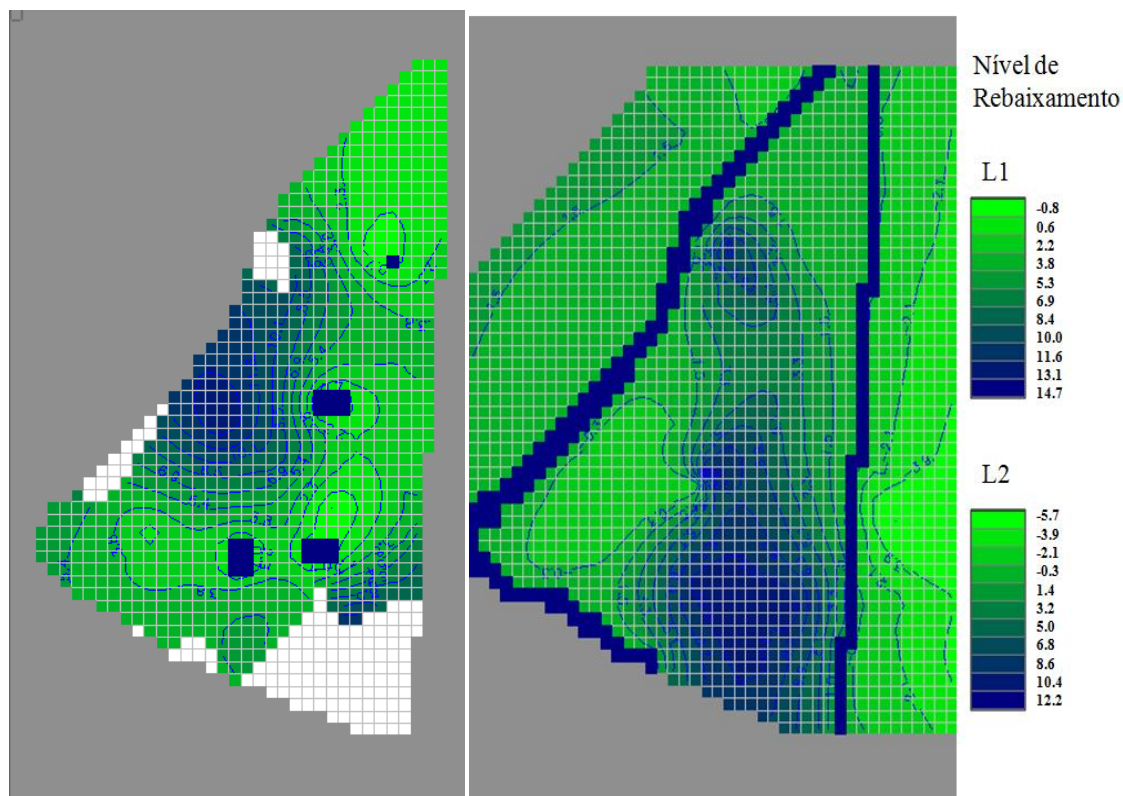
**Figura.4.28. Resultados do modelo de fluxo com características heterogêneas no período II – Pós-Obra e respectiva localização dos perfis. Esq.: L1; Dir.: L2**



**Figura. 4.29. Perfil na direção S-N do modelo fluxo heterogêneo no período II – Pós-Obra**



**Figura. 4.30. Perfil na direção W-E do modelo fluxo heterogêneo no período II – Pós-Obra**



**Figura.4.31. Nível de Rebaixamento no período II - Pós Obra Esq.: L1 Dir.: L2**

O mesmo acontece para a situação pós-obra. Os resultados dos modelos de fluxo considerando as condições de heterogeneidade não apresentam modificações.

Ainda, considerando as condições de heterogeneidade do meio, e pela interpretação dos perfis da geofísica verificou-se a existência de uma diferença na resistência do maciço a diferentes profundidades. Desta forma, sentiu-se a necessidade de construir um modelo com o maciço granítico subdividido em duas camadas distintas, onde cada camada expressa diferentes resistividades.

Assim, foi criado um modelo de fluxo com 3 camadas. A mais superficial corresponde aos depósitos de estéreis e as restantes ao maciço granítico individualizado por duas camadas com características distintas. A topografia das duas primeiras foi modelada de igual forma aos anteriores modelos e a terceira com morfologia idêntica à topografia de 1942. A espessura da terceira camada varia entre os 15 e 50 metros.

Em termos de condições fronteiras, foi admitido que a terceira camada funcionava de igual forma da segunda por se tratar do mesmo corpo lítico.

Foram introduzidas diferentes condutividades nas duas camadas do maciço granítico, com base nos resultados dos perfis da geofísica.

De forma a aperfeiçoar o modelo, a dimensão dos cachimbos foi reduzida com o objetivo de apresentar resultados mais próximos da realidade.



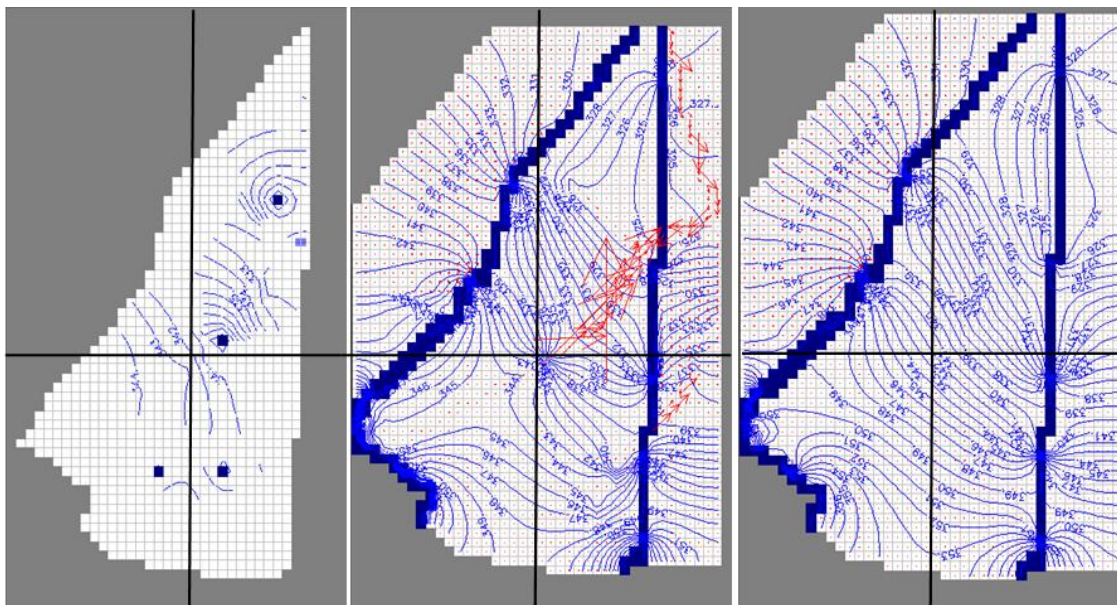


Figura.4.32. Resultados do modelo de fluxo com características heterogêneas no período I – Ante-Obra e respectiva localização dos perfis. Esq.: Camada 1; Centro: Camada 2; Dir.: Camada 3

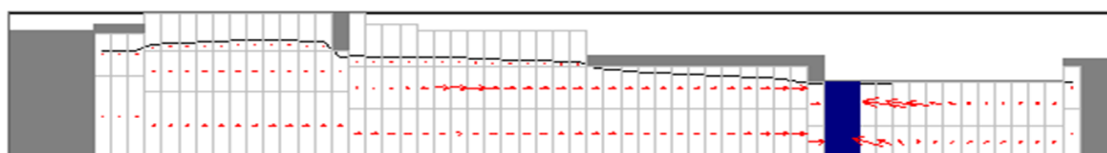


Figura.4.33. Perfil na direção S-N do modelo fluxo heterogêneo no período I – Ante-Obra

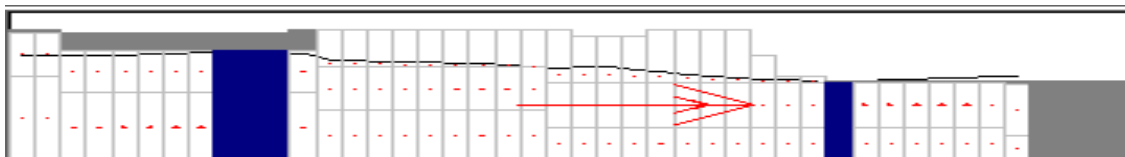


Figura.4.34. Perfil na direção W-E do modelo fluxo heterogêneo no período I – Ante-Obra

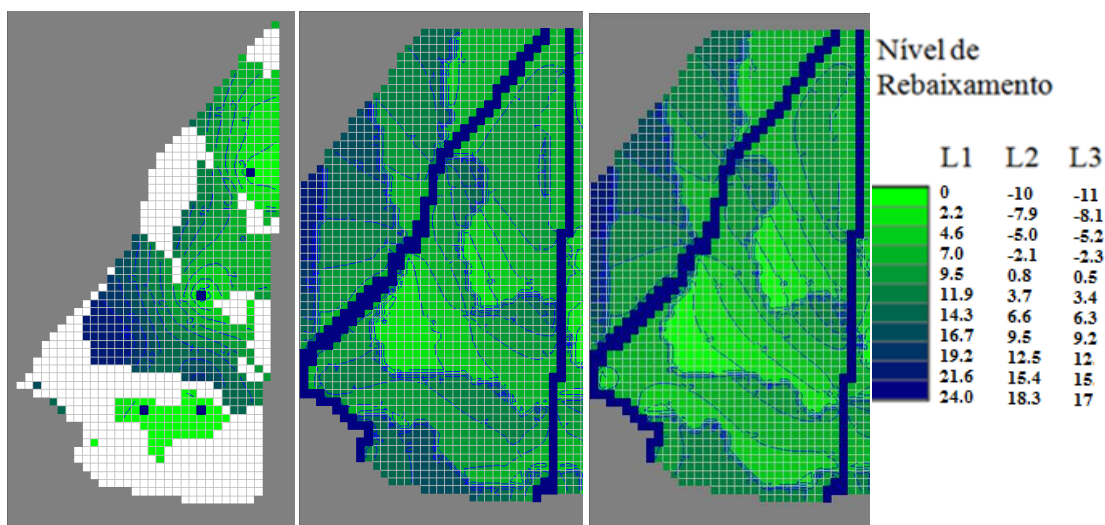
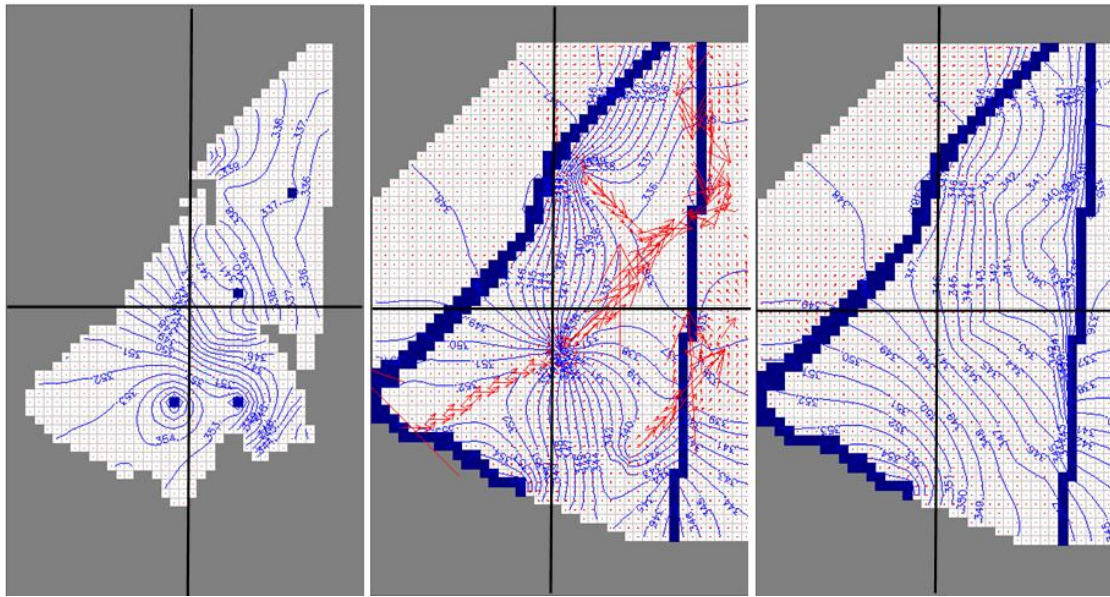


Figura. 4.35. Nível de Rebaixamento no período I – Ante-Obra na camada 1, 2 e 3

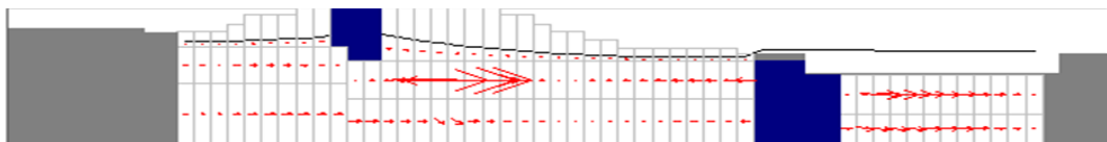
Considerando o modelo ante-obra de 3 camadas, verifica-se mudanças significativas no L1, que passa a encontrar-se maioritariamente a seco com funcionamento expresso pelos cachimbos. O L2, idêntico aos casos anteriores, em função da linha de água subjacente, contudo com menos expressão. E o L3 com um resultado de níveis de água mais regulares e fluxo com sentido SW-NE.

O gradiente hidráulico é mais expressivo na L2 comparativamente com as restantes camadas.

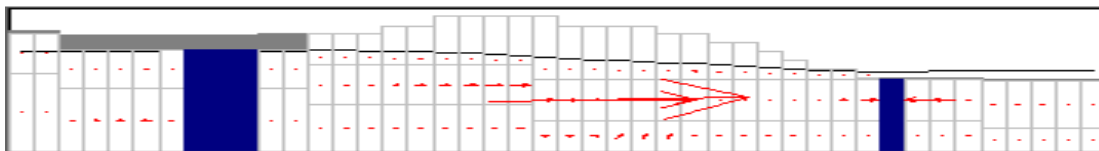
Os rebaixamentos no L2 e L3 evidenciam variabilidade no interior da barragem, com uma gama de valores de -11 até aos 18 metros. Os resultados de rebaixamento para estes dois layers são semelhantes.



**Figura.4.36** Resultados do modelo de fluxo com características heterogéneas no período II – Pós-Obra e respetiva localização dos perfis. Esq.: Camada 1; Centro: Camada 2; Dir.: Camada



**Figura.4.37.** Perfil na direção S-N do modelo fluxo heterogéneo no período II – Pós-Obra



**Figura.4.38.** Perfil na direção W-E do modelo fluxo heterogéneo no período II – Pós-Obra

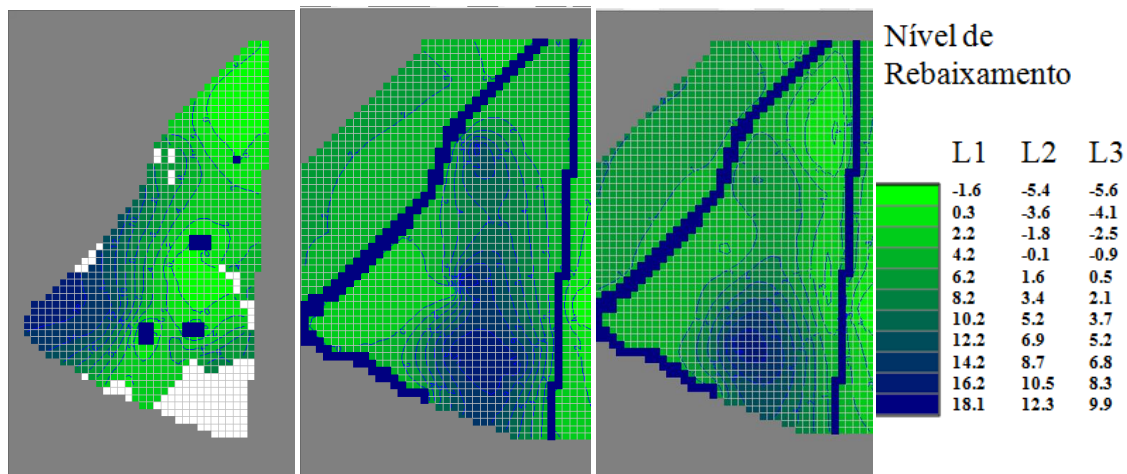


Figura. 4.39. Nível de Rebaixamento no período II – Pós-Obra na camada 1, 2 e 3

Para a situação pós-obra o caso do L2 e L3 é semelhante ao anterior. Contudo o L2 encontra-se mais marcado pela linha de água. No que se refere ao L1, os resultados são idênticos às situações pós-obra anteriores – Modelo interpretativo de referência e modelo considerando as heterogeneidades do meio.

#### 4.4.4 Conclusões Hidrodinâmica

Através do desenvolvimento dos modelos de fluxo, foi possível identificar que a direção de escoamento tanto à superfície como em profundidade é de SW para NE. Para a situação atual, pós obra, apesar das modificações sofridas na barragem, a direção do fluxo das águas manteve-se nas duas camadas.

Foram observadas diferenças para as duas situações, ante e pós obra. O Layer 1, no segundo período, com a ausência de recarga superficial pela instalação do sistema multi-camada, apresentou níveis piezométricos mais baixos e o seu funcionamento foi condicionado pela presença dos cachimbos na barragem. O Layer 2, não evidenciou diferenças significativas.

Neste layer o escoamento é direcionado pelo traçado de zonas de escoamento preferencial que coincidem com locais de maior densidade de fracturação e por onde percolavam pequenas ribeiras que drenavam para a ribeira principal previamente à deposição dos rejeitados.

O comportamento dos modelos considerando as heterogeneidades do meio não evidenciaram grande expressividade, contudo ao adicionar uma terceira camada, representativa do maciço granítico em profundidade (maciço granítico individualizado em duas sub-camadas) foi possível verificar que apresenta um comportamento distinto e que se considera mais adequado ao que será a realidade do local. Em profundidade o maciço encontra-se menos fraturado e alterado, sendo o fluxo mais regular, ao contrário do que se sucede na camada mais superficial do maciço granítico, que contacta com os materiais da barragem, onde o escoamento é irregular e função das variabilidades locais das características geológicas, da maior ou menor proximidade aos antigos “cachimbos” da barragem, dos efeitos devidos a falhas e fracturação mais concentrada e de antigas linhas de água a estas associadas.

Desta forma, considerando as diferentes características hidrogeológicas da área da barragem e considerando os resultados dos modelos anteriores foi possível identificar duas superfícies

piezométricas distintas. Uma superfície superior, situada no interior dos materiais da escombreira, que é composta por uma série de camadas de diferentes granulometrias, designadamente areias alternadas com materiais de matriz mais fina, entre os siltes e as argilas.

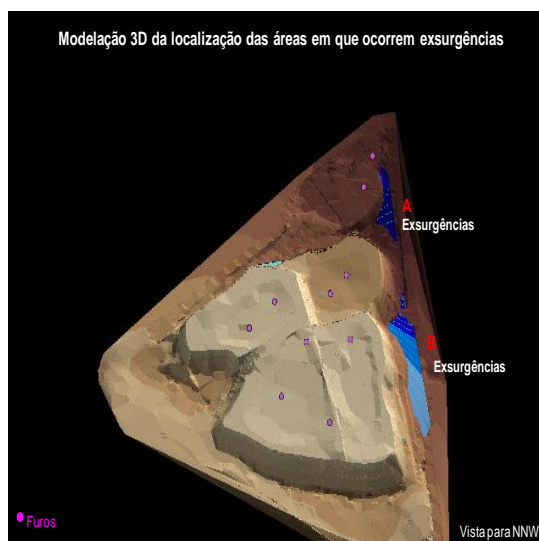
Esta composição e alternâncias nos materiais depositados na área da barragem, induzem uma baixa capacidade de drenagem propiciando a criação de bolsadas de água no corpo interno da barragem que localmente podem estar retidas pelos níveis mais finos fazendo com a barragem de rejeitados tenha um comportamento similar ao de um aquífugo, onde em certos locais a água poderá estar mais estagnada, e que sobrepõe a um outro meio, granítico, com funcionamento hidráulico muito distinto. A drenagem no granito superficial muito alterado e fraturado deverá inclusivamente, e comparativamente, encontrar-se mais facilitada do que no caso da drenagem no interior do corpo da barragem, dado por alternâncias de materiais argilosos, siltosos a areias de distintos calibres, onde, existem efeitos de compactação ao longo do tempo.

Tendo em conta as condições hidrogeológicas da barragem e das diferentes características dos materiais da escombreira e do substrato rochoso é possível que a zona de transição entre esta barragem e o maciço granítico subjacente, menos alterado e fraturado, funcione como um meio preferencial à percolação de água, verificando-se que a maior parte dos escoamentos subterrâneos no local estudado são condicionados pela localização das antigas linhas de água, instauradas em zonas de maior fracturação no granito. As águas de percolação provenientes do corpo da barragem que acedem ao aquífero sub-superficial circularão preferencialmente por este meio de transição, sendo que a passagem de escorrências para águas subterrâneas a maiores profundidades será localizado e fortemente condicionado pelas condições locais de alteração e fracturação.

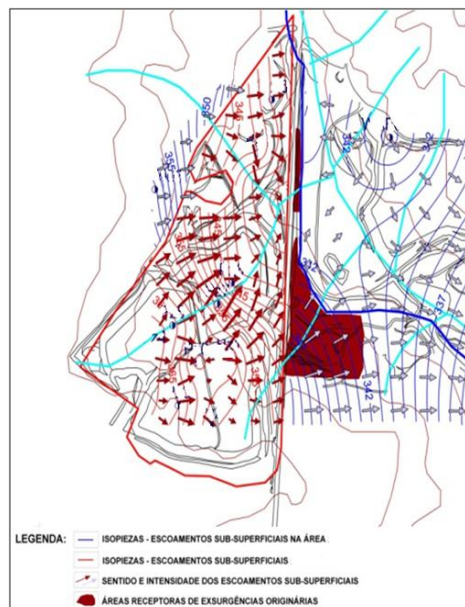
A situação que se verifica no local, previamente à realização das obras (Figura 4.40 e Figura 4.41) é consentânea com esta possível interpretação uma vez que as principais áreas de exsurgências da barragem coincidiam topograficamente com a localização deste meio de transição sendo que em períodos de maior pluviosidade, durante a estação húmida, era possível visualizar a localização destas exsurgências. De notar que estas se encontram, em termos espaciais, concordantes com a localização das antigas linhas de água (Figura 4.41) e os resultados dos fluxos preferenciais que drenam a partir da área da barragem para jusante, obtidos a partir da modelação numérica (Figura 4.42). A instalação de sistemas de drenagem sub-superficial na fase de obra terá obviado e atenuado os efeitos visíveis das drenagens e exsurgências que se verificam mais à superfície a partir desta barragem, situação que não foi preconizada na modelação numérica.

Não obstante é de se esperar, dados os índices de fracturação localmente existentes, que tais fluxos, apesar de rebaixados, continuem a perpetuar-se através das zonas de maior fluxo, próximo às antigas linhas de água que se encontravam instauradas no maciço granítico e que funcionavam hidráulicamente por fracturação.

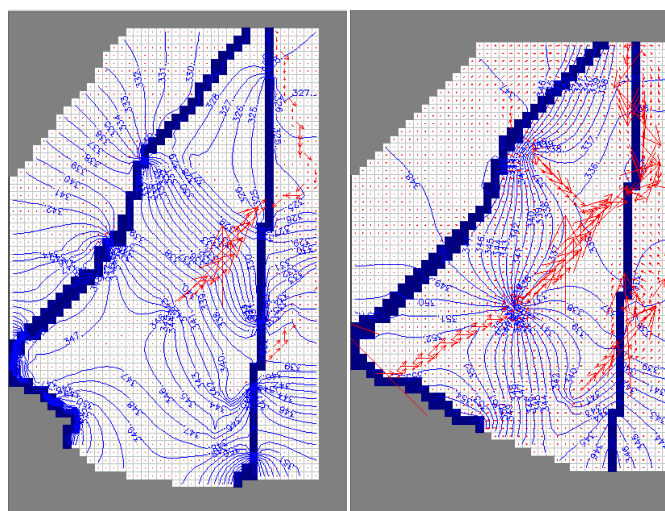




**Figura 4.40. Locais de exsurgências geradas a partir da barragem - situação ante-obra**



**Figura 4.41. Escoamentos na área da Barragem e sua envolvente - situação ante-obra**



**Figura 4.42. Escoamentos preferenciais e locais de exsurgências situação ante (Esq.) e pós-obra (Dir.)**

#### 4.5 Análise univariada espaço-temporal das tendências de evolução hidroquímica na barragem

(vide Anexo Confidencial 5)

## **5 ANÁLISE CONJUNTA DAS EVOLUÇÕES E TENDÊNCIAS ESPACIO-TEMPORAIS HIDRODINÂMICAS E HIDROQUÍMICAS**

*(vide Anexo Confidencial 6)*

## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A presente dissertação teve como principal objetivo analisar as evoluções hidrodinâmicas e hidroquímicas ocorridas no meio hídrico sub-superficial e subterrâneo no interior de uma barragem de rejeitados mineiros para as situações antes e após as obras de requalificação ambiental.

A avaliação foi desenvolvida de forma a compreender as modificações sofridas no meio hídrico ao longo do tempo, estabelecendo comparações de acordo com os cenários evidenciados entre a situação ante e pós-obra.

Os cenários resultantes do fluxo de escoamento para as duas situações – ante e pós obra – tanto à superfície como em profundidade, expressaram direções de escoamento similares, ou seja de SW para NE. Apesar do isolamento superficial e anulação dos efeitos de recarga por precipitação, o sistema hídrico sub-superficial e subterrâneo não foi interrompido. Neste, a presença de maiores densidades de fracturação, aliadas a elevados estados de alteração do maciço granítico favorecem a percolação de água e fluxo mais ativos na área de interseção com a barragem e zonas limítrofes à mesma.

Os resultados demonstraram diferenças no período II, layer 1, com a ausência de recarga superficial pela instalação do sistema multi-camada, de que resultaram em níveis piezométricos mais baixos no interior da barragem cujo funcionamento hidráulico continuará a ser condicionado pela presença dos cachimbos na barragem. No layer 2, não se evidenciaram diferenças significativas, visto a intervenção ter sido no sistema sobrejacente continuando em profundidade com o seu funcionamento hidráulico regular.

Assim, os modelos demonstraram a existência de dois meios com funcionamento hidráulico distinto. No primeiro, o da barragem, as velocidades de escoamento são consideravelmente mais baixas em relação às do segundo meio, do maciço granítico sobrejacente.

O meio representativo dos materiais rejeitados depositados na barragem é equivalente a um aquífugo, em virtude da presença de materiais de granulometria fina alternada com materiais mais grosseiros (areias finas e siltes), que reduzem a capacidade de transmissividade do fluxo e, assim, criam ambientes compatíveis para armazenamento mais prolongado de águas ácidas contaminadas residuais que ainda permanecem localmente acumuladas em “bolsadas” no interior da barragem.

Em profundidade, no granito subjacente, o fluxo é facilitado pelos locais de falhas e maior densidade de fracturação, que criam condições associadas a zonas específicas, de favorecimento aos mecanismos de migração de contaminantes.

Partindo de modelos do tipo equivalente mais homogêneos e com recurso a informações a perfis de resistividade elétrica foram desenvolvidos modelos numéricos de escoamento considerando a heterogeneidade do meio. As diferenças comportamentais entre estes distintos modelos não evidenciaram grande expressividade. Contudo, ao considerar-se o maciço granítico em profundidade, menos fraturado e alterado, verifica-se uma distinção entre possíveis diferentes fluxos, sendo o de maiores profundidades mais estável, com funcionamento mais regular relativamente ao das camadas sobrejacentes, respeitantes quer ao maciço granítico da franja mais superficial, substancialmente mais alterada e com zonamentos de maior fracturação, quer aos materiais rejeitados depositados na barragem.

Pela análise de tendências e morfologia geoestatística de séries de dados hidroquímicos, verificou-se existir correlação na variabilidade espacial e temporal das espécies químicas estudadas. Em termos gerais, a barragem exibiu melhorias nas concentrações dos diversos

elementos estudados. Verifica-se a ação provável de uma franja de oxidação, que segmenta a barragem em duas áreas distintas. Uma, a NW, com tendências de valores mais otimistas e com melhorias, e uma outra, a SSE, que apresenta alguma variabilidade em termos espaciais e de concentrações, mas de menor expressão que a anterior.

A área a SSE corresponde a um local onde a topografia é relativamente elevada e onde se encontram instalados nas proximidades alguns “cachimbos”. As águas acumuladas no interior do corpo desta barragem, formam “bolsas” de acumulação preferencial que dificilmente se escoam por falta de correntes de circulação/convexão devidas ao efeito da atual existência de um sistema de cobertura multi-camada e devidas a efeitos de armadilhas litológicas dados pela presença de intercalações de materiais finos argilosos.

Por outro lado, a zona a NW apresenta melhorias por corresponder a um local de entrada e circulação preferencial de água associado á existência de poucos volumes de material acumulado o que facilita os efeitos de lavagem e contribuirá para a diminuição dos níveis de contaminação.

## 7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Anderson, M, Woessner, W (1992) Applied Groundwater Modeling: Simulation of Flow and Advective Transport. Academic Press, San Diego, 5-97.
- Bain, JG, Blowes, DW, Robertson, WD, Frind, EO (2000) Modelling of sulfide oxidation with reactive transport at a mine drainage site. J. Contam. Hydrol 41, 73 – 94.
- Barbosa, S (2008) Modelação e Simulação Geomatemática de Escoamentos em Maciços Fraturados, Enquadramento do Tema e Apresentação de Possibilidades. 13-16.
- Barreiras, N (2009) Contribuição para a caracterização e Modelação Hidrogeológica do Concelho do Seixal, Monte da Caparica, 36-40.
- Blowes, D, Jambor, J Lortie, L Gould D, Hanton-Fong, C (1998) Geochemical, mineralogical and microbiological characterization of a sulphide-bearing carbonate-rich gold-mine tailings impoundment, Joutel, Québec, Applied Geochemistry, Vol. 13, No. 6, 687 - 690.
- Blowes, DW, Ptacek, CJ, Jambor, JL, Weisener, CG (2003) The geochemistry of acid mine drainage. B.S. Lollar (Ed.), Environmental Geochemistry, Treatise on Geochemistry, vol. 9. Elsevier, 149–204.
- Cabral, N, Neves, O, Garcês, P (2009) Actuação da EDM: 1988-2009. Instituto de Estudos Sociais e Económicos, Lisboa.
- Carvalho, F, Oliveira, J, Malta M (2015) Avaliação das Vulnerabilidades Radiológicas na Bacia do Rio Mondego e Proteção dos Ecossistemas Dulçaquícolas. Revista Recursos Hídricos, Vol. 36, Nº1, Associação Portuguesa dos Recursos Hídricos, Lisboa, 48 p.
- Chandler, RE, Scott, EM (2011) Statistical Methods for Trend Detection and Analysis in the Environmental Sciences. John Wiley & Sons, Ltd, University of Maryland, USA.
- Chiang, WH, Kinzelbach, W (2003) 3-D Groundwater Modeling with PMWIN: A Simulation System for Modeling Groundwater Flow and Pollution. Springer-Verlag Berlin Heidelberg GmbH.
- Crançon, P, Mangeret A (2012) Assessing Migration of Uranium Through Chalk Substrate: Field Study and Reactive Transport Modelling. Commissariat à l'Energie Atomique, International Journal of Environmental Pollution and Remediation Vol. 1, Issue 1, 1929-2732.
- Custodio, E, Llamas, MR (1983) Hidrogeologia Subterranea: Tomo II. 2ª Ed., Ediciones Omega, S.A., Barcelona.
- Decreto-Lei n.º 74/2001 de 26 de Fevereiro. Diário da República nº 48 – Série I A. Ministério do Ambiente e do Ordenamento do Território, Lisboa.
- Decreto-lei nº198-A/2001 de 6 de Julho. Diário da República nº 155 – Série I A. Ministério da Economia, Lisboa, 4084 - (2-7).
- Elberling, B, Nicholson, RV, Scharer, JM (1994) A combined kinetic and diffusion model for pyrite oxidation in tailings: a change in controls with time. J. Hydrol 157, 47 – 60.
- Feitosa, F, Filho J, Feitosa, E, Demetrio, J (2008) Hidrogeologia: Conceitos e Aplicações. CPRM, Laboratório de Hidrogeologia, 3ª Edição, Rio de Janeiro, 687-698.

- Francés, A (2008) Spatio-temporal groundwater recharge assessment: a data-integration and modeling approach, International Institute for Geo-Information Science and Earth Observation Enschede, Netherlands.
- Giere, R, Sidenko, NV, Lazareva, EV (2003) The role of secondary minerals in controlling the migration of arsenic and metals from high-sulfide wastes (Berikul gold mine, Siberia). *Appl. Geochem.* 18, 1347 – 1359.
- Haschke, JM (1998) Corrosion of uranium in air and water vapor: consequences for environmental dispersal. *Journal of Alloys and Compounds*; 278, 149-160.
- Hirsch, RM, Alexander, RB, Smith, RA (1991) Selection of methods for the detection and estimation of trends in water quality. *Water Resources Res.*, Vol.27, 803-814.
- Hirsch, RM, Slack, JR (1984) A nonparametric trend test for seasonal data with serial dependence. *Water Resources Research*, Vol. 20, No.1, 727-732.
- Hirsch, RM, Slack, JR, Smith, RA (1982) Techniques of trend analysis for monthly water quality analysis. *Water Resource Research*, Vol.18, No.1, 107–121.
- Holmström, H, Salmon, UJ, Carlsson, E, Petrov P, Öhlander, B (2001) Geochemical investigations of sulfide-bearing tailings at Kristineberg, northern Sweden, a few years after remediation. *The Science of the Total Environment* 273, 111-114.
- Holmström H, Öhlander, B (1999) Oxygen penetration and subsequent reactions in flooded sulphidic mine tailings: a study at Stekenjokk, northern, *Applied Geochemistry* 14, 747-750.
- Jaynes, DB, Rodowski, AS, Pionke, HB (1984) Acid mine drainage from reclaimed coal strip mines 1. Model description. *Water Resources Res.* 20, 233–242.
- Johnson, RH, Blowes DW, Robertson WD, Jambor JL (2000) The hydrogeochemistry of the Nickel Rim mine tailings impoundment, Sudbury, Ontario. *J. Contam. Hydrol.* 41, 49 – 80.
- Kundzewicz, ZW, Robson, AJ (2004) Change detection in river flow records – a review of the methodology. *Hydrological Sciences Journal*, Vol. 49, No. 1, 7-19, ISSN 2150-3435.
- Lefebvre, R, Hockley, D, Smolensky, J, Gelinas, P, (2001) Multiphase transfer processes in waste rock piles producing acid mine drainage, conceptual model and system characterization, *J. Contam. Hydrol.* 52, 137–164.
- McDonald, MG, Harbaugh, AW (1988) MODFLOW, A modular three-dimensional finite difference ground-water flow model, U. S. Geological Survey, Open-file report 83-875.
- McEachern, RJ, Taylor, P (1998) A review of the oxidation of uranium dioxide at temperatures below 400 degrees Celsius. *Journal of Nuclear Materials*, 254, 87-121.
- McGregor, RG, Blowes DW, Jambor JL, Robertson WD (1998a) Mobilization and attenuation of heavy metals within a nickel mine tailings impoundment near Sudbury, Ontario, Canada. *Environ. Geol.* 36, 305–319.
- McGregor, RG, Blowes DW, Jambor JL, Robertson WD (1998b) The solid-phase controls on the mobility of heavy metals at the Copper Cliff tailings area, Sudbury, Ontario, Canada, *Contam. Hydrol.* 33, 247 – 271.

- Mendoza, O, Hernández Ma, Abundis J, Mundo, N (2005) Geochemistry of leachates from the El Fraile sulfide tailings piles in Taxco, Guerrero, southern Mexico. *Environmental Geochemistry and Health* 28:243–255.
- Mozejko, J (2012) Detecting and Estimating Trends of Water Quality Parameters, *Water Quality Monitoring and Assessment*. West Pomeranian University of Technology, Szczecin Poland, 95-102.
- Nitzsche, O, Meinrath, G, Merkel, B (2000) Database uncertainty as a limiting factor in reactive transport prognosis. *Journal of Contaminant Hydrology*, Germany.
- Petrunic, B e Al, T (2004) Mineral/water interactions in tailings from a tungsten mine, Mount Pleasant, New Brunswick, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, Vol. 69, No. 10, 2469-2471.
- Ragnarsdottir, KV, Charlet, L (2000) Uranium behaviour in natural environments. *Environmental Mineralogy*. Mineralogical Society of Great Britain and Ireland, London, 2000, 333-377.
- Ritchie, AIM (1994) Rates of mechanisms that govern pollutant generation from pyritic wastes, Alpers, C.N, Blowes, DW, ACS Symposium Series, American Chemical Society, Washington, DC.
- Salbu, B, Janssens, K, Lind, OC, Proost, K, Danesi, PR (2003) Oxidation states of uranium in DU particles from Kosovo. *Journal of Environmental Radioactivity*, 64, 167-173.
- Salmon, SU, Malmstrom, ME (2004) Geochemical processes in mill tailings deposits: Modelling of Groundwater Composition. *Appl. Geochem.* 19, 1–17.
- Salmon, U, Malmström, M (2003) Geochemical processes in mill tailings deposits: Modelling of groundwater composition, *Applied Geochemistry* 19, 1-5.
- Salzsauer, KA, Sidenko, NV, Sheriff, BL (2005) Arsenic mobility in alteration products of sulphides-rich, arsenopyrite-bearing mine wastes, Snow Lake, Manitoba, Canada. *Appl. Geochem.* 20, 2303–2314.
- Smuda, J, Dold, B, Friese, K, Morgenstern, P, Glaesser, W (2007) Mineralogical and geochemical study of element mobility at the sulfide-rich Excelsior waste rock dump from the polymetallic Zn–Pb–(Ag–Bi–Cu) deposit, Cerro de Pasco, Peru. *J. Geochem. Explor.* 92, 97–110.
- Soares, A (2014). *Geoestatística para as Ciências da Terra e do Ambiente*. Instituto Superior Técnico Press, 3ª Edição, Lisboa, 3-136.
- Sracek, O, Choquette, M, Gelinas, P, Lefebvre, R, Nicholson, RV (2004) Geochemical characterization of acid mine drainage from a waste rock pile, Mine Doyon, Quebec, Canada. *J. Contam. Hydrol.*, 69, 45–71.
- Sracek, O, Mihaljevič, M, Křibek, B, Majer, V, Veselovský, F (2009) Geochemistry and mineralogy of Cu and Co in mine tailings at the Copperbelt, Zambia, *Journal of African Earth Sciences* 57 (2010) 14–30, 15-17.
- Stromberg, B, Banwart, S (1999) Weathering kinetics of waste rock from the Aitik copper mine, Sweden: scale dependent rate factors and pH controls in large column experiments. *J. Contam. Hydrol.*, 59–89.

Werner, K, Berglund S (1999) Effects of spatial variability on oxygen transport in sulphidic mining waste deposits. Conf. Mining and the Environment II, Sudbury, Canada, 243–252.

Wunderly, MD, Blowes, DW, Frind, EO, Ptacek, CJ, (1996) Sulfide mineral oxidation and subsequent reactive transport of oxidation products in mine tailing impoundments: a numerical model. Water Resouces. Res. 32, 3173–3187.

(*vide*, **Anexo Confidencial 7**)



## **ANEXOS**

## 58

Mes	En	Fb	Mz	Ab	My	Jn	Jl	Ag	Scp	Oc	Nov	Dic.
Lat.												
0°	12,1	12,1	12,1	12,1	12,1	12,1	12,1	12,1	12,1	12,1	12,1	12,1
5°	11,9	12,0	12,1	12,2	12,4	12,4	12,3	12,3	12,1	12,0	11,9	11,8
10°	11,6	11,8	12,1	12,3	12,6	12,7	12,6	12,4	12,2	11,9	11,7	11,5
15°	11,4	11,6	12,1	12,4	12,8	13,0	12,9	12,6	12,2	11,8	11,4	11,2
20°	11,1	11,4	12,0	12,6	13,1	13,3	13,2	12,8	12,3	11,7	11,2	10,9
25°	10,8	11,3	12,0	12,8	13,4	13,7	13,6	13,0	12,3	11,6	10,9	10,6
30°	10,5	11,1	12,0	12,9	13,7	14,1	13,9	13,2	12,4	11,5	10,7	10,2
35°	10,2	10,9	12,0	13,1	14,1	14,6	14,3	13,5	12,4	11,3	10,3	9,8
40°	9,7	10,6	12,0	13,3	14,4	15,0	14,7	13,7	12,5	11,2	10,0	9,4
45°	9,2	10,4	11,9	13,6	14,9	15,6	15,3	14,1	12,5	11,0	9,5	8,8
50°	8,6	10,1	11,9	13,8	15,5	16,3	15,9	14,5	12,6	10,8	9,1	8,1
55°	7,7	9,6	11,8	14,2	16,4	17,5	17,0	15,1	12,7	10,4	8,4	7,2
60°	6,8	9,1	11,8	14,6	17,2	18,7	18,0	15,6	12,7	10,1	7,6	6,3

**Anexo II** - Evapotranspiração potencial diária ( $\varepsilon$ ) para meses de 30 dias com 12 horas/dia de luz. De acordo com a temperatura do ar ( $t$ ) e do índice de calor anual ( $I$ ). Unidades:  $\varepsilon$  em mm/dia;  $t$  em  $^{\circ}\text{C}$ ;  $I$  em  $(^{\circ}\text{C})^{1,514}$

i	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100	105	110	115	120	125	130	135	140
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.5	0.1	0.1	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1.0	0.2	0.2	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1.5	0.3	0.2	0.2	0.2	0.2	0.1	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2.0	0.4	0.3	0.3	0.2	0.2	0.2	0.1	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2.5	0.5	0.4	0.3	0.3	0.3	0.3	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
3.0	0.6	0.5	0.5	0.4	0.4	0.3	0.3	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
3.5	0.7	0.6	0.5	0.5	0.4	0.4	0.3	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
4.0	0.8	0.7	0.6	0.5	0.5	0.4	0.4	0.3	0.2	0.2	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
4.5	0.9	0.8	0.7	0.6	0.6	0.5	0.4	0.4	0.3	0.2	0.2	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
5.0	1.0	0.9	0.8	0.7	0.6	0.6	0.5	0.4	0.3	0.3	0.2	0.2	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
5.5	1.1	1.0	0.9	0.8	0.7	0.6	0.5	0.4	0.3	0.3	0.2	0.2	0.2	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
6.0	1.2	1.1	0.9	0.9	0.8	0.7	0.6	0.5	0.4	0.3	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0
6.5	1.3	1.1	1.0	0.9	0.8	0.7	0.6	0.5	0.4	0.4	0.3	0.3	0.3	0.2	0.2	0.2	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0
7.0	1.4	1.2	1.1	1.0	0.9	0.8	0.7	0.6	0.5	0.5	0.4	0.4	0.3	0.3	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0
7.5	1.5	1.3	1.2	1.1	1.0	0.9	0.8	0.7	0.6	0.6	0.5	0.5	0.4	0.4	0.3	0.2	0.2	0.2	0.1	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0
8.0	1.6	1.4	1.3	1.2	1.1	1.0	0.9	0.8	0.7	0.6	0.6	0.5	0.5	0.4	0.3	0.3	0.3	0.2	0.2	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0
8.5	1.6	1.5	1.4	1.3	1.2	1.1	1.0	0.9	0.8	0.7	0.6	0.6	0.5	0.4	0.3	0.3	0.3	0.2	0.2	0.2	0.1	0.0	0.0	0.0
9.0	1.7	1.5	1.4	1.3	1.2	1.2	1.0	0.9	0.9	0.8	0.7	0.6	0.5	0.5	0.4	0.4	0.3	0.2	0.2	0.2	0.1	0.0	0.0	0.0
9.5	1.8	1.6	1.5	1.4	1.3	1.2	1.1	1.0	0.9	0.9	0.8	0.7	0.6	0.5	0.5	0.4	0.3	0.3	0.2	0.2	0.2	0.1	0.0	0.0
10.0	1.9	1.7	1.6	1.5	1.4	1.3	1.2	1.1	1.0	0.9	0.9	0.8	0.7	0.6	0.5	0.5	0.4	0.3	0.3	0.2	0.2	0.1	0.0	0.0
10.5	2.0	1.8	1.7	1.6	1.5	1.4	1.3	1.2	1.1	1.0	0.9	0.9	0.8	0.7	0.6	0.5	0.4	0.3	0.3	0.2	0.2	0.1	0.0	0.0
11.0	2.1	1.9	1.8	1.7	1.6	1.5	1.4	1.3	1.2	1.1	1.0	0.9	0.8	0.7	0.6	0.5	0.4	0.3	0.3	0.2	0.2	0.1	0.0	0.0
11.5	2.1	2.0	1.9	1.7	1.6	1.6	1.4	1.3	1.3	1.2	1.1	1.0	0.9	0.8	0.7	0.6	0.5	0.5	0.4	0.3	0.3	0.2	0.0	0.0
12.0	2.2	2.1	1.9	1.8	1.7	1.7	1.5	1.4	1.4	1.3	1.2	1.1	1.0	0.9	0.8	0.7	0.6	0.5	0.5	0.4	0.3	0.3	0.2	0.0
12.5	2.3	2.2	2.0	1.9	1.8	1.8	1.6	1.5	1.5	1.4	1.3	1.2	1.1	1.0	0.9	0.8	0.7	0.6	0.5	0.5	0.4	0.4	0.3	0.0
13.0	2.4	2.3	2.1	2.0	1.9	1.9	1.7	1.6	1.5	1.5	1.3	1.2	1.1	1.0	1.0	0.9	0.8	0.7	0.6	0.6	0.5	0.5	0.4	0.0
13.5	2.5	2.3	2.2	2.1	2.0	2.0	1.8	1.7	1.6	1.6	1.4	1.3	1.2	1.1	1.0	1.0	0.9	0.8	0.7	0.6	0.6	0.5	0.5	0.0
14.0	2.5	2.4	2.3	2.2	2.1	2.0	1.9	1.8	1.7	1.6	1.5	1.4	1.3	1.2	1.1	1.0	0.8	0.8	0.7	0.6	0.6	0.5	0.5	0.0
14.5	2.6	2.5	2.4	2.3	2.2	2.1	2.0	1.9	1.8	1.7	1.6	1.5	1.4	1.3	1.2	1.1	0.9	0.9	0.8	0.7	0.6	0.6	0.5	0.0
15.0	2.7	2.6	2.5	2.4	2.3	2.2	2.1	2.0	1.9	1.8	1.7	1.6	1.5	1.4	1.3	1.2	1.1	1.0	0.9	0.8	0.7	0.6	0.5	0.0
15.5	2.8	2.7	2.6	2.5	2.4	2.3	2.2	2.1	2.0	2.0	1.9	1.8	1.7	1.6	1.5	1.4	1.3	1.2	1.1	1.0	0.9	0.8	0.7	0.0
16.0	2.9	2.8	2.7	2.6	2.5	2.4	2.3	2.2	2.1	2.0	2.0	1.9	1.8	1.7	1.6	1.5	1.4	1.3	1.2	1.1	1.0	0.9	0.8	0.0
16.5	3.0	2.8	2.7	2.6	2.5	2.5	2.4	2.3	2.1	2.0	1.9	1.8	1.7	1.6	1.5	1.5	1.4	1.2	1.1	1.0	0.9	0.8	0.7	0.0
17.0	3.0	2.9	2.8	2.7	2.6	2.6	2.5	2.4	2.3	2.2	2.1	2.0	1.9	1.8	1.7	1.7	1.6	1.5	1.3	1.2	1.1	1.0	0.9	0.0
17.5	3.1	3.0	2.9	2.8	2.7	2.7	2.6	2.5	2.4	2.3	2.2	2.1	2.0	1.9	1.8	1.7	1.6	1.5	1.4	1.3	1.2	1.1	1.0	0.0
18.0	3.2	3.1	3.0	2.9	2.8	2.7	2.6	2.5	2.4	2.3	2.3	2.1	2.1	2.0	1.9	1.8	1.8	1.6	1.5	1.5	1.4	1.3	1.2	0.0
18.5	3.3	3.2	3.1	3.0	3.0	2.9	2.8	2.7	2.6	2.5	2.4	2.4	2.2	2.2	2.2	2.0	1.9	1.9	1.7	1.6	1.6	1.5	1.4	0.0
19.0	3.3	3.2	3.2	3.1	3.0	3.0	2.9	2.8	2.7	2.6	2.5	2.5	2.4	2.3	2.3	2.1	2.0	1.9	1.8	1.7	1.7	1.6	1.5	0.0
19.5	3.4	3.3	3.3	3.2	3.1	3.1	3.0	2.9	2.8	2.7	2.6	2.6	2.5	2.4	2.4	2.2	2.2	2.1	1.9	1.8	1.7	1.6	1.5	0.0
20.0	3.5	3.4	3.4	3.3	3.2	3.2	3.1	3.0	2.9	2.8	2.8	2.7	2.6	2.5	2.5	2.3	2.3	2.2	2.1	2.0	1.9	1.8	1.7	0.0
20.5	3.6	3.5	3.5	3.4	3.3	3.3	3.2	3.2	3.1	3.0	2.9	2.8	2.8	2.7	2.6	2.5	2.4	2.3	2.2	2.2	2.1	2.0	1.9	0.0
21.0	3.7	3.6	3.5	3.5	3.4	3.4	3.3	3.3	3.2	3.1	3.0	3.0	2.9	2.8	2.8	2.7	2.6	2.4	2.3	2.3	2.2	2.2	2.1	0.0
21.5	3.8	3.6	3.6	3.5	3.5	3.5	3.4	3.4	3.3	3.2	3.2	3.1	3.1	3.0	2.9	2.8	2.8	2.7	2.5	2.4	2.4	2.3	2.3	0.0
22.0	3.8	3.7	3.7	3.6	3.6	3.6	3.5	3.4	3.3	3.3	3.3	3.2	3.1	3.1	3.1	3.0	2.9	2.7	2.6	2.6	2.6	2.5	2.4	0.0
22.5	3.9	3.8	3.8	3.7	3.7	3.7	3.6	3.6	3.5	3.4	3.4	3.4	3.3	3.2	3.2	3.1	3.1	3.1	2.9	2.8	2.8	2.8	2.7	0.0
23.0	4.0	3.9	3.9	3.8	3.8	3.8	3.7	3.7	3.6	3.6	3.6	3.6	3.5	3.4	3.4	3.3	3.3	3.3	3.1	3.0	3.0	3.0	2.9	0.0
23.5	4.1	4.0	4.0	3.9	3.9	3.8	3.8	3.8	3.8	3.7	3.7	3.7	3.6	3.6	3.5	3.4	3.4	3.4	3.3	3.2	3.2	3.2	3.1	0.0
24.0	4.2	4.1	4.0	4.0	4.0	4.0	3.9	3.9	3.9	3.9	3.8	3.8	3.7	3.7	3.6	3.5	3.5	3.5	3.4	3.3	3.3	3.3	3.2	0.0
24.5	4.2	4.1	4.1	4.1	4.1	4.1	4.0	4.0	4.0	4.0	3.9	3.9	3.9	3.8	3.8	3.7	3.7	3.7	3.6	3.5	3.5	3.5	3.4	0.0
25.0	4.3	4.2	4.2	4.2	4.2	4.2	4.1	4.1	4.1	4.1	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	3.9	3.9	3.8	3.8	3.8	3.8	3.7	3.7	0.0
25.5	4.4	4.3	4.3	4.3	4.3	4.3	4.3	4.3	4.3	4.2	4.2	4.2	4.2	4.2	4.2	4.1	4.1	4.1	4.0	4.0	4.0	4.0	3.9	0.0
26.0	4.4	4.4	4.4	4.4	4.4	4.4	4.4	4.4	4.4	4.4	4.4	4.4	4.4	4.4	4.4	4.3	4.3	4.3	4.3	4.3	4.3	4.3	4.2	0.0

**Anexo III** - Valores de referência de condutividade hidráulica e permeabilidade intrínseca para diferentes formações geológicas (adaptado de Freeze e Cherry, 1979 *in* Feitosa, *et al*, 2008)

Permeabilidade	Permeável				Semi-permeável				Impermeável					
Aquífero	Bom				Pobre				Não tem propriedades aquíferas					
Solo	Cascalho puro		Areia pura ou areia com cascalho		Areia muito fina, silte				Argila não intemperizada					
	-				Solo Orgânico		Argila estratificada							
Rocha									Rocha petrolífera		Arenito		Calcário Dolomite	
K (cm/s)	10 <sup>-2</sup>	10 <sup>-1</sup>	10 <sup>0</sup>	10 <sup>-1</sup>					10 <sup>-2</sup>	10 <sup>-3</sup>	10 <sup>-4</sup>	10 <sup>-5</sup>	10 <sup>-6</sup>	10 <sup>-7</sup>

**Anexo IV** - Porosidade efetiva para diferentes materiais (Johnson, 1967 *in* Feitosa, *et al*, 2008)

Material	Porosidade Efetiva $\eta_e$
Argila	0,00-0,05
Argila Arenosa	0,03-0,12
Silte	0,03-0,19
Areia Fina	0,10-0,28
Areia Média	0,15-0,32
Areia Grossa	0,20-0,35
Areia com cascalho	0,20-0,35
Cascalho fino	0,21-0,35
Cascalho médio	0,13-0,26
Cascalho grosso	0,12-0,26